Public Works Canada
Travaux publics Canada

Architectural and Engineering Services
Services d'architecture et de génie

Building Performance Evaluation Series

Airtightness and Pressure Monitoring

Document D36

Canada

Building Performance Evaluation Series

Airtightness and Pressure Monitoring

Document D36

AES 1-4:86-45

March 1988

90-02179/

The contents of this document represent the views of the authors and are not necessarily the views or policies of the Department of Public Works.

The Minister of Public Works makes no representation or warranty, express or implied, with respect to this publication or the programs or information described in this publication, their quality, merchantability, or fitness for any particular purpose, or their adequacy to produce any particular result. In no event shall the Minister or Her Majesty the Queen in right of Canada, Her employees, servants or servants be legally liable to any persons or persons for any damage, whether direct, indirect or consequential, resulting from the use of said publication or the programs or the information contained therein.

Published by Architectural and Engineering Services
Public Works Canada

Public Works Canada / Travaux publics Canada

DOCUMENT DATA

1. Document Title AIRTIGHTNESS AND PRESSURE MONITORING	2. Control Number AES/SAG 1-4:86-45
	3. Date March 1988
4. Author(s) A. Colantonio	5. Consultant's Ref. No.
6. Project Manager	7. Discipline Series No. D36
8. Preparation Agency and Address Building Performance Division, Public Works Canada Room C-548, Sir Charles Tupper Building Riverside Drive, Ottawa, Ontario, K1A 0M2 Telephone: (613) 998-7830	9. Document Type Guideline
	10. No. of Pages 40
11. Sponsoring Agency and Address D.C. and R.T. Appropriated Programs Accommodation Branch	12. PWC File No. A4270-16
	13. PWC Project No. 602055
14. Supplementary Notes Questions and comments should be directed to the preparation agency, in 8 above.	15. SSC Publication No.
	16. ISBN

17. Abstract

Air leakage represents a substantial part of the heating and cooling load of most large buildings.

Building Performance Division (BPD) studies into air leakage characteristics of buildings are part of the development of the Total Building Performance concept and are a response to the need for accurate energy consumption analysis of existing buildings.

This document outlines the methods employed by the BPD to determine airtightness characteristics and infiltration rates at different pressure differentials, i.e. air leakage characteristics of a building.

First method is the use of calibrated fans to either pressurize or depressurize a building to determine the airtightness characteristics at various pressure differentials.

In the case of a very large building, the tracer gas decay rate method is used to determine infiltration rates at various mechanical system operating settings and resulting pressure differences.

18. Distribution Statement Copies are available from: Documentation Centre Architectural & Engineering Services Public Works Canada Sir Charles Tupper Bldg., Riverside Dr. Ottawa, Ontario K1A 0M2	19. Keywords	
	20. Documentation Centre Catalogue No. BP D36b	21. Price

TABLE OF CONTENTS

1.	**INTRODUCTION**	*1*
1.1	Purpose and Objectives	*1*
1.2	Background Information	*2*
2.	**TERMS OF REFERENCE**	*5*
2.1	General Framework	*5*
2.2	Limitations of Technique	*6*
3.	**METHODOLOGY**	*8*
3.1	Stage I – Preliminary Assessment	*8*
3.1.1	Description of Techniques	*8*
3.1.2	Equipment	*9*
3.1.3	Detailed Procedure	*9*
3.1.4	Analysis and Assessment	*11*
3.1.5	Resource Allocation and Timing	*12*
3.1.6	Documentation: Creation and Retention of Working Papers	*12*
3.2	Stage II – Simple Measurement Techniques	*12*
3.2.1	Description of Techniques	*13*
3.2.2	Equipment	*13*
3.2.3	Detailed Measurement Procedure	*14*
3.2.4	Analysis and Assessment	*18*
3.2.5	Resource Allocation and Timing	*19*
3.2.6	Documentation: Creation and Retention of Working Papers	*21*
3.3	Stage III – Specialized In–depth Monitoring	*22*
3.3.1	Description of Techniques	*22*
3.3.2	Equipment	*23*
3.3.3	Detailed Measurement Procedure	*24*
3.3.4	Analysis and Assessment	*28*
3.3.5	Resource Allocation and Timing	*33*
3.3.6	Documentation: Creation and Retention of Working Papers	*35*
4.	**REFERENCES**	*36*
5.	**APPENDICES**	37
5.1	Standard Terms and Units of Measurement	*37*
5.2	Applicable Authorities and Regulations	*38*
5.3	Building Performance Evaluation Document List	*40*

LIST OF FIGURES

3.3.1	Air Leakage Curves	*32*

1. INTRODUCTION

Air leakage (infiltration and exfiltration) represents a substantial part of the heating and cooling load of most large buildings. It can also be an important parameter of indoor–outdoor pollution relationships allowing untreated air to penetrate the building. Heat loss associated with envelope air leakage of typical office buildings can be as much as 40% of the total heat load in most Canadian climates.

Air leakage can be difficult to quantify. It is not only a function of internal factors such as building tightness and configuration, inside–outside temperature differences, and the action of the controlled ventilation systems (fresh air make up). It is influenced as well by external factors such as variable wind speed, direction and surrounding buildings.

Building Performance Division (BPD) studies into air leakage characteristics of buildings are part of the development of the Total Building Performance Concept and a response to the need for accurate energy consumption analysis of existing buildings. Results of these studies are used to answer other questions related to fresh air ventilation rates, interior air quality and thermal comfort in perimeter zones.

Excessive leakage through the enclosure can increase energy consumption; cause degradation in areas of abnormally high leakage through accumulated condensation and produce thermal control problems in perimeter zones. Analysis of the impact of air leakage on energy consumption along with findings from other test procedures (thermographic inspections), determine the feasibility and payback of retrofit solutions. They also determine whether the building meets current PWC standards.

1.1 PURPOSE AND OBJECTIVES

The following methods are employed by BPD to determine air tightness characteristics and infiltration rates at different pressure differentials:

a) The use of calibrated fans to either pressurize or depressurize a building to determine the air tightness characteristics at various pressure differences. These fans may be part of the building mechanical systems or a special fan that is set up outside, or external to the building.

b) In very large buildings, calibrated fans may not be capable of producing sufficient through envelope pressurize differences. The tracer gas decay rate method is used to determine infiltration rates at various mechanical system operating settings and resulting pressure differences.

It is important to understand that these two methods do not give the same results but both are used to determine air leakage characteristics of a building.

In conjunction with air tightness measurements, through envelope pressure differentials are monitored for the following reasons:

a) To obtain pressure differential measurements for the following tests: air leakage test, minimum and maximum ventilation tests, and HVAC system monitoring during normal building operations.

b) To quantify air leakage in specific areas, when combined with data from air tightness testing and thermographic surveys.

c) To determine average operating pressure differentials for specific operational modes of building mechanical systems.

d) To determine total energy consumption attributable to air leakage when doing computer modeling of energy consumption.

e) To monitor pressure differential affects of various wind speeds and directions for all sides of the building and determine pressure differential patterns around the building for different wind speeds and directions.

1.2 BACKGROUND INFORMATION

The rate of air flow in and out of a building depends on the pressure differential between inside and outside and on air flow resistance offered by the envelope assembly. The pressure exerted on the envelope is caused by wind, differences in the inside and outside air density, and mechanical ventilation systems. The total pressure difference is approximately the algebraic sum of the three separate factors outlined above.

$$Q = \sqrt{Q_S{}^2 + Q_W{}^2 + Q_V{}^2} \qquad (1)$$

where Q = flow rate (l/s)
Q_S = flow rate due to stack effect
Q_W = flow rate due to wind pressures
Q_V = flow rate due to ventilation equipment

This equation slightly overestimates the infiltration rate especially for tall buildings.

Pressure differences causing exfiltration are responsible for the migration of water vapour from inside the building into cold spaces in walls, window frames and roofs. Vapour diffusion through openings in the fabric can cause rapid condensation build–up resulting in envelope deterioration. This is most pronounced during cold weather in areas where exfiltration is prevalent. Openings through which air and water vapour can leak exist in buildings at cracks and junctions of dissimilar materials on exterior walls. This air leakage can also be the cause of dirt and pollution entry, increased cost of heating and cooling and loss of humidity in winter and a potential humidity increase in summer.

Floor–to–floor separations in multi–storey buildings are neither completely open inside nor completely airtight. Air flows vertically through stairwells, elevator shafts, etc. Stack effect is caused by differences between inside and outside ambient air temperatures. Warm air is less dense than cold air, therefore will rise and displace colder denser air. At the same time air which is being cooled, will become denser and settle. During the heating season, cold infiltrating air is warmed by heating and mechanical systems and rises to the upper levels of the building. The less dense heated air on the upper levels produces a positive building pressure. Displaced air from the lower floors creates a negative building pressure at lower levels.

There is a proportional relationship between the inside–outside temperature differential and stack effect. Therefore when the inside–outside temperature difference increases, stack effect increases. When mechanical system and wind pressures are negligible the neutral pressure plane will occur at approximately mid–height so that cold air infiltration below and warm air exfiltration above are equal. During the heating season, air comes in at the bottom, flows upward through the shafts and other openings in the floors and passes out through openings in roofs and upper level exterior walls.

During the cooling season, when exterior air temperature is greater than interior air temperature, the flow of air through the building is reversed. Warm exterior infiltrating air at upper levels is cooled and settles to the lower levels. Since infiltrating air throughout the building is cooled, it settles to the lower levels where it creates a positive interior pressure. At upper levels a negative interior pressure builds up.

Air movement through exterior walls at lower levels during the heating season causes cold drafts and introduces exterior pollutants and contaminants into the building. Air exfiltration through roofs and upper walls can give rise to damage from condensation when water vapour is cooled below the dew–point temperature within the enclosure assembly. These problems increase with building height, lower outdoor temperatures and higher interior relative humidity.

During the summer, when outside air temperatures are higher than inside, patterns of pressure differences and air flow are reversed. Exfiltration occurs at lower levels and infiltration at upper levels. Air flows downward within the building. This inverted stack effect is much less significant than winter conditions due to the smaller temperature differences between inside and out during the Canadian cooling season.

The second factor that produces pressure differentials on exterior enclosures is wind. Pressure differentials are affected by wind speed and direction, the adjacent environment (this includes both vegetation and other structures), and the building shape. The effects of wind on the building enclosure can be altered minimally using wind barriers and alterations to building shape. Generally half of the building is under positive wind pressure while the other half is under negative wind pressure. The total surface area affected by positive wind pressure is not necessarily equal to the total surface area that is under negative wind pressure. Since the building has a finite volume, the total positive pressure created by the wind is equal to the total negative pressure created by the wind.

Pressure created by mechanical systems, regulating air movement through the building enclosure is the third factor that produces air pressure differences. Air leakage patterns and interior pressures are affected by any imbalance of the supply and exhaust air handling systems. Building systems can be programmed to induce either a positive or negative pressure in order to regulate air leakage through the enclosure. Through daily operator's logs, it is possible to determine when and how mechanical systems are set. Most buildings normally operate on only a few different settings during each season. These would range from minimum fresh air and no circulation to maximum fresh air and full circulation. The majority of modern commercial buildings are positively pressurized to overcome drafts and related thermal comfort problems, reduce perimeter

heating, and prevent the entry of unfiltered pollutants and environmental elements. The amount of fresh air required to achieve a given degree of positive pressurization will depend on the airtightness of the enclosure.

Pressurization of building interiors increases potential condensation problems that may result from the exfiltration of warm moist inside air. Therefore, greater attention to increasing the air tightness of the enclosure in pressurized buildings is necessary.

2. TERMS OF REFERENCE

2.1 GENERAL FRAMEWORK

Induced pressure technique using calibrated fans is used to determine air tightness and air leakage characteristics of a building while tracer gas decay rate method is used to determine the infiltration rate of a building at specific pressure differentials. In the tracer gas dilution method, a known amount of tracer gas is introduced into a volume and the rate of change (decay) in tracer concentration is monitored. The air change rate can be determined from the logarithmic decay rate of tracer concentration with respect to time.

With the availability of a calibrated fan, the required air tightness data can be obtained entirely through induced pressurization (or depressurization) test methods. The fan flow rate associated with a known pressure differential is used to calculate envelope air leakage characteristics.

Both methodologies consist of three parts.

a) The measurement of pressure differences across the exterior walls of the building.
b) The measurement and/or calculation of the stack effect caused by temperature differences; and determination of wind effects on pressure differentials throughout the enclosure.
c) The calculation of resulting air leakage when the effect of wind and stack effect are known.

Pressure monitoring during air tightness testing is necessary to obtain pressure differential vs flow rate data used to develop air leakage curves. When carried out with and without mechanical dampers sealed these tests determine leakage rates through these dampers. On tall buildings pressure differences are measured at the top and bottom of the building and sometimes on each floor to verify the stack pressures. Equations are available that neutralize temperature differentials affect on pressure differences.

Monitoring of average pressure differentials during normal building operations can be carried out during all times of the day and related to operator's logs. Standard operating pressures are used to determine flow rates and approximate volume of air leaking into the building along with their associated energy costs.

As well as monitoring average pressure differentials for at least four elevations, individual readings are taken at as many locations as possible. Individual readings are tabulated and referenced to wind speed and direction data, to verify the relationships between wind direction and speeds and the pressure differentials throughout the building envelope. The temperature differential is normalized.

Similar pressure monitoring configurations are used to obtain pressure differential data across the building enclosure for minimum and maximum ventilation rates for the building's mechanical systems. These data are used to determine operational parameters of the building's mechanical systems.

Monitoring of static pressures upstream and downstream of the supply and return air fans in some mechanical systems are carried out while systems are in full fresh air and minimum fresh air settings. This testing is conducted for mechanical engineering.

Testing can take place at any time of the year, but the temperature differential factors have to be normalized to a common value to compare test results.

2.2 LIMITATIONS OF TECHNIQUE

2.2.1 Pressure Monitoring Techniques

Pressure differential monitoring of the building enclosure is continuously recorded by strip chart recorder or manually, for numerous locations throughout the building. The strip chart recorder is used to obtain a graphical output of the pressure profile over a period of time. It is used primarily to continuously record average pressure differentials at various levels. The information obtained has to be manually extracted for input into other calculations. Even though there is a wealth of information in these charts, data cannot be automatically processed for more detailed data manipulation.

Human error is an important factor when data are obtained manually. Locations of pressure taps determines time required to obtain readings. If these locations are dispersed throughout the building people have to man one pressure tap at a time to obtain many instantaneous readings or they have to spent considerable time to travel from one location to another to obtain spot readings. Readings are taken at different times and comparisons are approximate in relation to time. Data from this technique is manually extracted from log sheets for input into calculations.

Automatic data acquisition of pressure differentials, either single or averaged readings, have not been carried out to date, but has been identified as the route to follow in future development of pressure monitoring.

2.2.2 Calibrated Fan Method

External calibrated fans can only be used on buildings of limited volume and where air leakage through the envelope at a specific pressure differential (approximately 50 Pa) is equal to the flow rate generated by the fan. The limiting factor in this technique is the flow rate the calibrated fan can produce. A fan owned by NRCC is the only fan presently available in Canada that can be used to test large buildings.

An alternative to using the NRCC fan is to calibrate building exhaust fans. Ideally one fan should be used to simplify the procedure but it is rare to find one fan large enough to generate sufficient pressure differentials.

Calibrated fans are used for either pressurization or depressurization techniques. A disadvantage of these methods is that leakage data are only obtainable at pressures in excess of those that occur either naturally or most of the time. These results can be unrepresentative because excess pressures can alter the size of leakage openings, sometimes permanently causing an increase in leakage rates at lower pressure differentials.

The method has advantages in its simplicity, direct comparability of results with other buildings, accuracy without reference to minimal wind conditions, comparability to other results based on different temperature differentials, usefulness in locating leakage paths in conjunction with thermography, and usefulness in specifying effective retrofit measures.

2.2.3 Tracer Gas Techniques

This technique is useful in large buildings where: external calibrated fans cannot create sufficient pressure differences for test purposes; when such fans are not available; when existing mechanical systems cannot be calibrated effectively; and when mechanical systems do not have the capacity to generate sufficient pressure for testing.

The tracer gas technique is time consuming and labour intensive. Since it measures air infiltration for a specific pressure differential, only one rate is obtained at a time. Tests at different operating conditions have to be conducted separately. Dependent upon size and configuration of the building, one test takes from four to eight hours to complete. Since each building is unique, seeding and sampling techniques may alter from one building to another. Comprehensive planning of these activities is critical for the collection of relevant test data.

Seeding and even mixing of the tracer gas in the test volume has to be properly carried out to obtain accurate decay rate data. This is sometimes more difficult then it appears. The uniform mixing of the tracer gas is necessary to ensure comparative results from one area to another. If the seeding is carried out through the mechanical system, areas that are not properly ventilated will receive less tracer gas that those that receive adequate or more than adequate ventilation. If the ventilation system is operated in full air circulation mode during sampling time to ensure thorough distribution of tracer gas, problems with adequate mixing may develop if ventilation systems are not properly balanced and/or return air systems draw more air from the interior zones than exterior zones of the building.

If seeding is done manually, inconsistencies between seeding methods and locations being seeded may affect the accuracy of test data. Manual seeding is preferred but is labour intensive.

Sampling is carried out either through return air ducts over a long period of time (two – eight hours) or manually by simultaneously walking through each floor space and collecting samples for previously defined floor areas. Collection through air ducts assumes approximately equal amounts of air returning to the mechanical system fans from each area of the building. In buildings without individual return air ducts to central main ducts, uniform return from all floor areas does not occur. Simultaneous sampling of predetermined areas requires many people and is time consuming when testing the complete building. With both techniques, numerous samples are obtained and considerable time is required to analyse samples.

3. METHODOLOGY

3.1 STAGE I – PRELIMINARY ASSESSMENT

3.1.1 Description of Techniques

3.1.1.1 Plan/Archive Analysis

Prior to the initial site visit, the team reviews available as–built drawings and/or latest contract documents to develop a thorough understanding of the building's major components. Focus is on certain areas that might need testing. Notes are made to pinpoint areas of investigation on field trips and to develop preliminary concepts for the future field testing.

Strategies for quantitative testing are determined as a result of this review. These include fan pressurization and depressurization methods as well as tracer gas methods. The factors that influence the type of air leakage test to be performed and the strategy to monitor the pressure differentials through the enclosure include; the size, shape, internal design of building and the location, number and size of the mechanical systems.

Information determined through this review process include; size of the fan required for fan pressurization methods, types of available fans for testing, best type of tracer gas test for building, types of available tracer gasses and analysis equipment, number, locations and sampling strategy for tracer gas testing.

3.1.1.2 Expert Walkthrough

In an expert walkthrough of the building, the senses are used to determine the building condition and to identify possible problem areas. This takes place during the first field trip when the study team observes the existing building envelope condition and determines the feasibility of specific air leakage test strategies. To help in data acquisition, photographs and written notes are taken to be used later for planning work and layout of test locations in subsequent field trips. This information is used in preparation of interviews and questionnaires.

a) Plan Notation – notes made on a floor plan (or site plan) to give immediate physical reference to potentially abstract data. Initial site visits are intended to develop hunches for future follow–up and this technique will allow the inventiveness and skill of a keen observer to be employed. Observations should be made at different times of the day, when the building is occupied and unoccupied. The more precise the plan on which the notations are made, the more useful the data will be during analysis away from the site. (ref. Functional Sciences: Class D, Document – D21 – Plan Annotation)

b) Checklists – developed from observations to indicate conditions and their frequency. These would include such obvious enclosure deficiencies as efflorescence, staining, spalling, delamination, corrosion; location of air intakes and exhausts; type of extra clothing worn by employees; the presence of personal fans, heaters or humidifiers; staining on window sills, walls, tiles; and the like.

c) Photographs – are helpful when they document ways in which people have changed their interior environment to achieve a certain end. They demonstrate how the environment shows signs of degradation or document visible exterior problems.

d) Air flow testing – are carried out on suspect areas with "smoke pencils". This air flow tester is used to detect slight air currents and their directions in rooms, near windows or near possible air leakage paths.

3.1.2 Equipment

3.1.2.1 Plan/Archive Analysis

Contract documents to be reviewed consist of;

working drawings
specifications
addendums
change orders
retrofits after the original construction

Document reviews are based on traditional building science knowledge and principles as they relate to air leakage testing. Refer to section 4.0 for references dealing with these principles.

3.1.2.2 Expert Walkthrough

The most important set of equipment is one's own sensing apparatus. One's sense of sight, touch, smell, and taste will all help locate potential air leakage problems. The following list of equipment also proves useful:

a) 35 mm cameras with various lenses (35 mm, 50 mm, 50 mm macro, 40 mm – 160 mm zoom) and a flash unit.
b) note book, reductions of plans for notation.
c) smoke pencils
d) ladders, small and large extension
e) tools – penknife, measuring tape, screwdrivers and screws, pliers, hammers, caulking, tape, for minor destructive testing.
f) overalls for protection in dirty areas.
g) complete set of contract documents for reference.

3.1.3 Detailed Procedure

3.1.3.1 Plan/Archive Analysis

The following plan details are looked at to identify weakness in design or construction:

a) wall details
b) window/wall joints
c) roof details

d) wall/roof junctions
e) floor to wall junction
f) expansion joints

Identify the type and location of sealants.

The following information about the mechanical systems must be known to plan any testing procedure:

a) location of shafts (mechanical and electrical)
b) air balance, exhaust versus supplied air
c) predicted negative and positive pressure differentials
d) location of dampers for fresh air make-up
e) location of exhausts; labs, electrical rooms, washrooms, etc.

Identify changes between the time of construction and the present.

3.1.3.2 Expert Walkthrough

On the initial walkthrough, a tour by the building manager provides a general overview and an introduction to the current functional activities. This includes a tour of the mechanical and electrical rooms, penthouses and boiler plant. The condition of roofs and supply, return, exhaust louvers and grills are noted. This is the opportunity to discuss any building operation problems with the building engineer.

A general walkthrough is made, taking notes and meeting with section heads of departments, inspecting the interior architectural components especially windows, exterior stairwells and the wall/roof junction above the suspended ceiling. Photographs are taken of any damaged areas and noted on floor plans. Comments pertaining to each photograph are made and kept track of by numbering each shot.

Air flow testing is done on those areas that might be suspect. This is carried out using smoke pencils. Notes are made on location of air leakage paths or anomalies in the supply/exhaust air flow patterns and these notes are registered on annotated plans.

For purposes of air leakage testing, the following activities are carried out during the expert walkthrough.

a) Identify possible air leakage and pressure monitoring locations on the enclosure. This is done by visual inspections, smoke pencil testing, interviews with the building engineer, manager and various building occupants. Work schedules for building occupants are obtained to determine test scheduling.
b) As-built documents are studied after the initial site visit to verify specific locations for pressure monitoring. The site visit is used to verify information from contract drawings.
c) Although some planning of the air leakage and pressure monitoring evaluation occurs before the first site visit, planning of these activities are finalized after the initial site visit when other test procedures are also planned.
d) Prior to first site visit, availability of calibrated fans are assessed. The openings that these fans are to be inserted into are inspected to verify use of fans in test buildings.

e) Availability of manpower from local sources to carry out testing are established during this site visit. This includes both skilled and unskilled labour for activities such as manufacturing of mechanical louver plugs for pressurization testing, installation of materials for access into inaccessible locations on roofs, and seeding and sampling of building for tracer gas testing.

3.1.4 Analysis and Assessment

3.1.4.1 Plan/Archive Analysis

The volume of the building and its anticipated air leakage rate is used to determine the size of fan required for a fan pressurization or depressurization test. If the building is too large for any available calibrated fan to be used, tracer gas testing will have to used. Building volumes are required to determine the necessary amount of tracer gas needed to seed the building.

The exterior openings and building height are used to determine potential stack effect during test conditions and to locate pressure taps for pressure differential monitoring. The building height is also used to determine the potential wind effect on the envelope.

The building design will determine the strategy for tracer gas release and sampling. The design of the mechanical system will determine whether it can be used to generate sufficient pressures for tracer gas testing. Mechanical system design will determine whether calibration is possible to monitor the flow rate through the system at different pressure differentials. If this is possible, exterior calibrated fans are not necessary to carry out fan pressurization or depressurization tests.

3.1.4.2 Expert Walkthrough

Data is assembled by writing all information on sets of floor plans, site plan and elevations. This is assessed using building science principles pertaining to the dynamic effects of moisture, temperature, air movement, chemical and biological attack.

Final assessment of collected data is made in conjunction with results from inquiries into the following areas of interest:

- air leakage
- mechanical system
- functional analysis studies
- thermographic inspections
- resistance and capacitance studies
- air quality testing
- vibration testing
- electrical systems
- lighting systems
- thermal comfort testing

3.1.5 Resource Allocation and Timing

3.1.5.1 Plan/Archive Analysis

Review and analysis of the contract document for the purposes of air leakage testing and pressure differential monitoring varies from one to two person/weeks. It is dependent upon the size and complexity of the building. This activity is conducted by a building scientist who is a professional (architect or engineer) trained in the principles of building sciences.

3.1.5.2 Expert Walkthrough

The expert walkthrough is generally no longer than one complete working day. For best interaction with all transdisciplinary team members, it is scheduled so that all disciplinary team members involved in the planning of tests carried out in subsequent field trips are present to obtain identical information and to share common knowledge of the building. The project manager of the field testing schedules, the building manager, engineer and property manager should be present to answer questions from the field testing management group. This group is comprised of various professionals and technicians working in the areas listed in section 3.1.4.2.

After the site visit, a meeting with all team members is required to work out strategies and discuss all significant information obtained from the site visit. A minimum of one complete afternoon is required for this activity. Dependent upon complexity of the field work, additional time up to two days may be required for this process.

3.1.6 Documentation: Creation and Retention of Working Papers

All information related to volume of interior spaces, areas of exterior walls and roofs, projected air leakage rates and size and capacity of building mechanical systems are recorded and retained for required calculations during analysis and assessment of work carried out in Stage III. Fact sheets on building dimensional data are created. Potential strategies are identified, noted and discussed amongst all involved disciplines to determine the most effective testing methodology.

Information retained from the site visit is recorded by 35 mm photographic film (b&w and colour slides and prints), by individual team members' notebooks and by annotated plans developed as an amalgamation of the individual disciplinary notes on an annotated plan of the building. This annotated plan is developed during a planning meeting after the site visit. Photographic data is utilized in reports.

3.2 STAGE II – SIMPLE MEASUREMENT TECHNIQUES

Test procedures classified as STAGE II include monitoring of pressure differentials through the building enclosure and use of smoke pencils and bombs to identify paths of air leakage through the envelope. Although classified as simple measurement techniques, monitoring of pressure differential is carried out as part of other STAGE III test methods for the following reasons; to obtain pressure differentials during normal

mechanical systems operations throughout different seasons of the year, to monitor pressure differentials obtained during air leakage testing, to monitor wind pressures at specific building envelope locations.

3.2.1 Description of Techniques

3.2.1.1 Pressure Monitoring

To monitor average pressure differentials through enclosures during air leakage testing and operating pressure during normal mechanical system operation, plastic tubing is installed to four elevations of the enclosure on the same level as the pressure meter or transducer. The tubes are brought together at a manifold with a single tube feeding into the measuring device. Individual readings are also possible from this configuration if individually hooked up to the measuring device. The data is recorded either intermittently by hand or by strip chart recorder.

The same procedure is used to monitor pressure during maximum and minimum fresh air ventilation testing.

To monitor wind pressure effects on different elevations, individual pressure taps are located at specific locations throughout the enclosure and readings are obtained at identical times and are manually recorded.

In tall structures pressure differential data for different levels is obtained by plastic tubing in vertical circulation spaces. The tubing has 'T' junctions at each floor level with a tube leading to an open area on that floor. Pressure readings are obtained by inserting the measuring device at the top or bottom end and opening one end of a tube and closing off all others.

In tall structures, the average pressure differential at the top of the structure is measured using the same procedures as the outlined above for the ground floor. Individual reading are also obtained for each elevation on the top levels using the same methods as the ground floor pressure monitoring.

3.2.1.2 Smoke Pencils and Smoke Bombs

Smoke pencils and smoke bombs are used to observe air flow on both sides of the building enclosure. Smoke is released in various quantities from this equipment and its flow in, around and through the building envelope is visually monitored. Smoke pencils are used to observe micro air flow paths while bombs are generally used to observe air flow patterns in large volumes.

3.2.2 Equipment

3.2.2.1 Pressure Monitoring

- Magnahelix pressure meters; ranges 0.00 to 0.1 inches H_2O, 0.00 to 0.5 inches H_2O, and 0.00 to 0.25 inches H_2O.
- Hays pressure meters. (Refer to manufacturers manual for operating information)

- NRC pressure transducers, multiple range selection.
- 8 mm and 10 mm O.D. plastic tubing and plastic connectors and pinchcocks.
- NRC copper tube pressure manifold.
- Masking tape, duct tape (2" wide).
- 4 m stepladder, 3 m stepladder.
- 6 mm O.D. copper tubing, pipe cutter.
- 6 mm O.D. capillary tubes.
- NRC strip chart recorder (measuring flow rate vs. pressure differential). Strip chart recorder paper.
- Blank output sheets to record pressure differential readings times and locations.

3.2.2.2 Smoke Pencils and Smoke Bombs

- Draeger Smoke Pencil Kit CH 216
- Fog–Master FM–1 Smoke Generator (theatrical fog maker)

3.2.3 Detailed Measurement Procedure

3.2.3.1 Average Pressure Differential Measurement for One Level

The location, number and configuration of pressure tubes within the building are dependent upon the test carried out and building size, shape and height. Determine this prior to the field measurement trip.

Prior to a field measurement trip, draw up a schedule of activities carried out during the air tightness testing, thermographic inspection and pressure monitoring evaluation. This is to be verified by the energy analysis team leader, the mechanical engineer, the building operator who will be operating the building exhaust fans and/or with the contractor who is operating the calibrated fan.

Install tubing so that flattened sections of 6 mm copper tubing underneath exterior doors are attached to plastic tubing on either side of the doors to ensure passage of air. Exterior tubing is fastened to exterior walls. The interior tubing extends from copper tubing to a common source (manifold) in the center of the building, at same level as the exterior tubing. The interior tubing from all elevations attach to openings on one side of a pressure tube manifold while a single tube extends from the other side to hook up to a strip chart recorder. This configuration is used to obtain average pressure differentials at single levels. Tubing is run along the floor and taped down at high traffic areas.

The design of the pressure manifold is important. The diameter of the mixing chamber must be greater than that of the tubes leading into it. In order to dampen sudden pressure fluctuations glass capillary tubes are used between the pressure meter or transducer and the manifold. This ensures the smallest resistance takes place after mixing of air pressures from all sources. This assumes resistance produced by the flattened copper tubing under the exterior doors is approximately equal to that produced by the capillary tube.

Pressure tubes are inspected for separations at junction points and for openings throughout the lines. Lines are checked by individually hooking up to a pressure transducer or meter. This is done periodically to ensure accurate results.

Manual pressure differential measurements can be taken during various times of the day for entire field testing. Datum is recorded onto blank data sheets. Mechanical system settings are obtained from the operator's logs and correlated to the pressure differential readings. Both individual and average pressure readings for monitored locations are obtained. To reduce potential errors, similar instruments are used to obtain all readings.

3.2.3.2 Pressure Differential Measurement for Various Levels

To test for pressure differentials between levels in a building, average pressure differential for the top floor should be obtained. Refer to detailed procedures outlined in previous section (3.2.3.1). In this situation, tubing is extended from the top floor up through doorways leading to the roof. Tubing is run to four elevations and extended over the parapet so that the open end is approximately at the same level as the pressure meter on the interior. Small two to three pound weights can be added to the ends of the tubing on the exterior to assure that they remain as close to the building as possible.

Tubing is run from the top to the bottom of the building in order to determine the pressure difference between the level where the average interior–exterior pressure differential is measured and all other floor levels. At each level a T junction is inserted into the vertical tubing and horizontal tubing is run into a corridor of that level. Pinchcocks are used to cut off air flow on the horizontal tubing and the open end on the bottom level. The top end of the vertical tubing is inserted into the pressure meter. The other opening on the meter has tubing from the pressure manifold. By removing one pinchcock at a time the pressure differential from the two levels with open ends is obtained. Glass capillary tubing is inserted into the pressure tubing on both sides of the meter to provide resistance to minimize errors due to varying resistances in other parts of the tubing. This work is done with the use of walkie–talkies to co–ordinate opening and closing of pressure tubes on different levels.

In most high rise buildings vertical tubing can easily be located in fire stairs with horizontal extensions to corridor areas on each floor. When pinchcocks are removed from horizontal tubes they are placed on the vertical tubing immediately below the T junction to measure pressure differentials on each level. Lines are constantly checked to ensure no openings other than those intended. Monitoring is more easily conducted during evenings when the building is not in use.

This technique to measure pressure differences is also used to determine pressure differentials throughout the building when testing for infiltration rates using the tracer gas decay rate method. When used for air tightness testing this technique is useful in determining average pressure profiles.

3.2.3.3 Pressure Monitoring: Air Tightness Tests Using Calibrated Fan

Pressure tubing is set up according to procedures outlined in section 3.2.3.1 and when dealing with a high rise building, according to procedures outlined in section 3.2.3.2.

To calculate leakage rates using calibrated fans, the flow rate produced by the fan is related to a corresponding pressure difference. Pressure readings are an integral part of this procedure. They are required for each set of flow rate readings as well as for verification procedures between readings.

The following outlines when pressure readings are taken and for what purposes.

a) When testing maximum flow rate of fan unit, pressures are required to ensure adequate data will be obtained for testing. If not enough pressure is produced by the fan unit, building exhaust fans are turned on to provide additional pressure.

b) With all exhaust air fans on and calibrated fan off and sealed, exhaust air fans are turned off one by one, pressure differentials and flow rates are monitored and fan numbers noted on the strip chart recorder.

c) With calibrated fan off and sealed and exhaust air fans off, the base pressure differential measurement is recorded. This represents the combined wind and stack effect pressures for the specific level.

d) With calibrated fan off and sealed, it is adjusted to the same pressure differential reading as noted with all the exhaust fans on and the flow rate recorded. This flow rate represents the volume of air exhausted from the building by exhaust fans.

e) The calibrated fan with or without the addition of building exhaust fans is adjusted to maximum flow rate and pressure differentials. The flow rate is reduced to produce pressure differentials incremental lower by 10 Pa. The pressures and subsequent flow rates are recorded. This is done for a minimum of five different pressure differentials.

f) If additional pressure tubing is located on other parts of the building, individual pressure differential readings are taken at these locations. These readings are compared to average readings to establish wind effects on the building during air leakage testing.

g) The above set of tests are conducted with the supply and relief air louvers sealed with plywood plugs in the case of pressurization testing or 6 mm polyethylene sheets and tape in the case of depressurization testing. All dampers are opened. When exhaust fans are not used their dampers are also closed and their louvers are sealed in the same manner as previously mentioned. Pressure readings are obtained for these conditions.

h) If tracer gas decay rate air leakage testing is conducted, average pressure across the enclosure is constantly monitored. During this testing mechanical systems are turned on to full recirculation mode to facilitate mixing of tracer gas. With the calibrated fan unit and/or building exhaust systems off, the base pressure differential is measured to determine the combined effect of wind and static pressure.

The average pressure differential of the four main elevations is monitored by a diaphragm type pressure transducer and recorded on a strip chart recorder. During air tightness testing, average pressure differential measurements are continuously recorded on the strip chart recorder. Infiltration testing allows time for recording of individual readings at pre–selected locations. Readings are taken on a regular basis at about ten to fiftteen minute intervals throughout testing. Readings are dependent upon the number and distance of pressure tubes from each other and the number of people taking readings. Diaphragm type pressure transducers, meters and HEISSE digital pressure meters are used to obtain these readings.

3.2.3.4 Pressure Monitoring: Min/Max Mechanical System Settings

This procedure is done to find average pressure differentials through the building enclosure under minimum and maximum fresh air settings of the mechanical system. In some buildings, where operation of the mechanical systems are automatically conducted by central computer, the building operator sets controls to preselected settings. These are modified seasonally.

Average pressure readings are obtained during each setting to determine mechanical system effect on the building pressure profile.

Set–up procedures detailed in section 3.2.3.1 are used to obtain pressure measurements. Measurements are obtained either on a random basis when systems are known to be at specific settings or the building operator can set mechanical systems to specified settings for five to ten minutes while pressure readings are obtained. This technique is favoured because systems can be turned off altogether to determine base pressure due to stack effect and wind pressure. The operator is asked to set systems to 4 different settings. These include:

1. full fresh air supply dampers wide open
2. semi–closed supply air dampers
3. fully closed supply air dampers full recirculation
4. completely off

During each setting, time and pressure differential readings are taken at each location.

3.2.3.5 Smoke Pencil and Smoke Bomb Testing

Smoke pencils are used to determine macro air flow around and through the building envelope. Smoke pencils are not limited to use during air tightness testing or other high pressure differential conditions. They can be used at any time to determine macro air flow through the envelope at desired location. This equipment is most effective at locations of suspected air leakage, generally found at junctions of dissimilar materials on the exterior wall. When used on large homogeneous surfaces, air flow will generally be vertical. This is indicative of little or no air leakage through the wall.

Smoke bombs are used to verify specific air leakage locations within the enclosure. They are generally most effective when used in high pressure differential conditions. These conditions are set up by building mechanical systems, external calibrated fans (when used for air leakage test purposes), or during extreme high wind conditions. Smoke bombs are set off inside buildings. Visual observation of smoke is carried out in adjacent interior and exterior spaces. Other locations include adjoining areas linked by shafts or ducts. It is important to observe the flow of smoke to all parts of the building in order to fully understand the flow characteristics of air in a particular test area. In some instances air leakage will not necessarily occur to the exterior but to other areas of the building through the exterior wall or adjoining shafts and columns.

Because of thick clouds generated by this method, smoke bomb testing should be done during off work hours. It can be integrated into air leakage testing very effectively especially if prior thermographic inspection has already indicated possible air leakage through the enclosure.

3.2.4 Analysis and Assessment

3.2.4.1 Average Pressure Differential Measurement for One Level

Average pressure differential is recorded either manually on blank output sheets or automatically onto a strip chart. Data is read directly off the chart or output sheet and used for analysis of air leakage testing, maximum fresh air testing, minimum fresh air circulation testing and mechanical system testing of specific operational modes.

These measurements are used in conjunction with flow rates from air tightness testing to determine air leakage characteristics and tracer gas testing to determine infiltration rates for enclosures.

Average pressure differential monitoring is carried out to quantify forces causing air leakage and to determine the relative significance of identified air leakage patterns from thermographic inspections.

Average pressure readings are compared to individual pressure readings. Offsets from the average, are related to wind speed and stack effect. The relationship between pressure differential measurements on different sides of the building and wind speed are studied.

Average pressure readings are used as norms when calculating pressure profiles of a building due to stack effect.

3.2.4.2 Pressure Differential Measurement for Various Levels

Pressure difference due to stack effect (at a distance h from the neutral pressure plane relative to the barometric pressure at the neutral pressure plane) is calculated by the following formula:

$$Ps = 0.0342\ h\ Pt\ \left(\frac{1}{To} - \frac{1}{Ti}\right) \qquad (2)$$

where Ps = pressure due to stack effect (Pa)
h = height of building (m)
Pt = barometric pressure (Pa)
To = outside temperature (oK)
Ti = inside temperature (oK)

Parameters having greatest effect on this equation are, the height of the building and the difference between To and Ti. This assumes there is small change in the barometric pressure.

Almost all high rise buildings have so many vertical openings that the vertical air flow can be considered to be unimpeded.

3.2.4.3 Pressure Monitoring: Air Leakage Tests

The air leakage characteristics of a building are defined by equation:

$$q = C\ (\Delta P)^n \qquad (3)$$

where q = overall air leakage rate/unit area of exterior wall ($L/s.m^2$)
C = flow coefficient ($L/s.m^2.(Pa)n$)
Δp = pressure differential across exterior wall (Pa)
n = flow exponent (variable between .5 and 1.0)

Pressure monitoring is required throughout air leakage testing. Average pressure differential readings through the enclosure are required to calculate air leakage rates.

3.2.4.4 Pressure Monitoring Min/Max Mechanical System Setting

The average pressure differential data obtained from procedures outlined in section 3.2.3.1 is correlated to mechanical system settings. Resulting pressures for each setting are compared to expected pressures settings. This allows building operators and engineers to modify mechanical system settings to achieve desired conditions for each season. It is used to develop a better understanding of the dynamic forces that effect infiltration and exfiltration.

Pressure data are also used to determine operating pressures during the minimum and maximum ventilation rate testing. For assessment procedures of data used for minimum fresh air circulation test and mechanical system pressure differential testing, refer to Property Administration Manual 6; Forms and Directives, PWC.

3.2.4.5 Smoke Pencil and Bomb Testing

This test procedure produces qualitative results. Smoke pencils, when used around the building envelope, indicate direction and relative velocity of air flow. The path of air flow through the enclosure can also be determined but requires more detailed inspection and analysis. Generally paths of air leakage are easier to identify using smoke bombs.

Smoke bombs are used to qualitatively determine location as well as paths of air leaks through the enclosure. Once identified, these locations can be further investigated using thermographic equipment. Once specific areas of known air leakage problems are identified, more detailed air leakage testing can be planned and carried out to determine quantitative leakage. This information is used by mechanical engineers to determine heating and cooling loads. It also is used to substantiate thermal comfort complaints and different mechanical system settings for perimeter zones.

3.2.5 Resource Allocation and Timing

3.2.5.1 Average Pressure Differential Measurement for One Level

The set–up of pressure tubing throughout a building requires between two to twenty man hours. It can be accomplished by one person but generally carried out by two or more people. The parameters determining the time required to carry out this task include:

- the size, shape and configuration of the building,
- the ease of access in and out of the building,
- the availability of access to the exterior from specific levels
- the ease with which tubing can be located in specified locations

Tubing is installed at the start of the field trip and left in place throughout the entire field trip. Pressure measurement readings are carried out as part of individual test procedures and time allocation is referenced to specific tests measurements.

Removal of tubing and other pressure monitoring equipment requires between one and ten man hours.

Testing, calibration, and repair of equipment is minimal due to the relative simplicity of the equipment. It averages between two and five man hours per field trip. Planning averages three to nine man hours per field trip.

The professional coordinating air leakage testing can also be responsible for the planning, set–up and operation of the pressure monitoring equipment. Additional field help from technicians is required for set–up and data recording.

Because data is manually recorded, little analysis is required. One person day is sufficient to cover all uses of data.

3.2.5.2 Individual Pressure Measurement

Although individual pressure readings can be taken through the entire field trip, they are usually only taken for specific testing. If readings are taken manually, a minimum of one person per every two or three locations is necessary throughout testing. Automatic datalogging is presently not available. The greater the number of locations, the more manpower is required to obtain readings.

A professional is required to set up and plan the simultaneous reading of pressure monitoring equipment by technicians. At least one pressure meter or transducer is required by each person monitoring pressures during this activity.

Testing, calibration, and repair of equipment averages two to five man–hours per field trip, while planning averages three to nine man–hours per trip.

Analysis requires two to four person days, depending on amount and complexity of data.

3.2.5.3 Pressure Differential Measurement for Various Levels

Set–up and dismantling of pressure tubing for this testing requires between 12 and 30 man–hours. It is generally done in conjunction with set–up of tubing for average pressure readings for one level. Readings are taken as part of other testing procedures (i.e., air leakage testing, infiltration tests). The taller the building the greater the time required to obtain readings on all floors. For an average ten–storey building a minimum of one hour is required to obtain pressure data for all floors. Planning is carried out as per section 3.2.5.1. and done by the professional in charge of testing. Technician are utilized to obtain readings.

Little analysis is required of this data. Less than one man–day is required.

3.2.5.4 Pressure Monitoring: Air Tightness Tests Using Calibrated Fan

This activity is carried out as part of the air leakage testing procedure. The technician operating the calibrated fan also monitors pressure and flow rates throughout the test. This test runs throughout one full evening. Refer to section 3.2.3.1 for set–up of pressure tubing.

Analysis and documentation of strip chart recorded data requires three to five man–days. Data is used for calculation of air leakage rates.

3.2.5.5 Pressure Monitoring: Min/Max Mechanical System Settings

This activity is part of the minimum and maximum fresh air ventilation testing. Apart from resources and timing requirements stated in section 3.2.5.1 a mechanical engineer and the building operator are required for the planning and field testing.

Analysis and documentation of data recorded on blank output sheets is minimal (one or two man–days). Data is used primarily for mechanical systems testing and for development of accurate energy simulation models.

3.2.5.6 Smoke Pencil and Smoke Bomb Testing

The resources required for this testing are dependent on required work during field trips. Generally one to four technicians are required to carry out this testing. The use of smoke pencils during preliminary field trips is an integral part of the investigation and required no additional resources. Smoke bomb tests conducted as part of air leakage and infiltration/exfiltration testing will require between two and five technicians for two to sixteen hours.

Analysis and documentation will require between two and five man–days. This includes processing and development of photographic data. This is considered a part of the air leakage and infiltration testing.

3.2.6 Documentation: Creation and Retention of Working Papers

3.2.6.1 Average Pressure Differential Measurement for One Level

Individual readings are recorded on blank output sheets while continuous readings are recorded on strip charts. This data can be included in reports as appendices.

3.2.6.2 Individual Pressure Measurement

Readings are recorded onto blank output sheets during field testing. Data is typed out and included in reports as appendices.

3.2.6.3 Pressure Differential Measurement for Various Levels

Readings are recorded onto blank output sheets during field testing. Data is typed out and generally included in test reports.

3.2.6.4 Pressure Monitoring: Air Leakage Tests Using Calibrated Fan

Continuous pressure readings are recorded onto strip charts along with flow rates of the calibrated fan. Information regarding test procedures (fans on or off, seals on louvers on or off, operating conditions of mechanical systems) are included on the strip chart for references. Results of the strip chart are photocopied and included in appendices to the air leakage report. Air leakage curves are developed using this data.

3.2.6.5 Pressure Monitoring: Min/Max Mechanical System Settings

Readings are recorded on onto blank output sheets during field testing. Data is typed out and included as an appendix to the pressure monitoring test report. This data is also cross referenced to report on minimum and maximum ventilation rate testing.

3.2.6.6 Smoke Pencil and Smoke Bomb Testing

Photographs, diagrams of air leakage paths and identification of air leakage locations obtained from field tests using smoke bombs are gathered and used in the air leakage report. Similar information gathered by use of smoke pencil is generally included in the visual observation report but can also be located in the air leakage report. If photographic data is large, it can be located in an appendix.

3.3 STAGE III - SPECIALIZED IN-DEPTH MONITORING

This section deals with: the fan pressurization method using external calibrated fans to determine air tightness characteristics, and the tracer gas decay rate method to determine infiltration rates at specific pressure differentials. With both methods, the building can either be pressurized or depressurized and the building mechanical systems can be used to increase the pressure differential across the enclosure.

3.3.1 Description of Techniques

3.3.1.1 Fan Pressurization Method

Refer to sections 3.1 and 3.2 for analysis procedures complimenting these test methodologies and associated pressure monitoring techniques.

A building is pressurized by calibrated fans and air flow rates measured to estimate envelope tightness characteristics. If the building mechanical system fans' flow rates cannot be calibrated both individually and together, then external calibrated fans are used to generate required pressure differentials and related air flow rates for this testing. If external fans do not provide sufficient pressures, then building mechanical systems are used to augment the calibrated fans once their flow rates are calibrated.

In order to negate minor pressure differences due to wind disturbances large pressure differences (50 Pa or greater) are required for testing. In large or leaky buildings this requires the use of very large fans.

This technique directly measures envelope leakage characteristics. Since it is dependent upon all factors contributing to pressure differences across envelopes, it should not be carried out in windy conditions. Leakage characteristics of various elements of the envelope (walls, doors, operable windows and mechanical louvers) can also be determined.

The building is either pressurized or depressurized and air flow is measured. Buildings can be directly compared by expressing the induced air leakage at standardized pressure differences.

Briefly the procedure is as follows:

a) With louvers, doors and operable windows sealed, obtain a minimum of 5 flow rate readings with a calibrated fan, at pressure differentials of 10, 20, 30, 40, and 50 Pa. This data is used to to plot an air leakage curve for the entire building envelope.
b) Obtain flow rate readings at similar pressure differentials as (a) for air tightness of enclosure without seals on doors and operable windows.
c) Obtain flow rate readings at maximum pressure differentials for air tightness of enclosure without seals on the doors, operable windows and mechanical louvers.

3.3.1.2 Tracer Gas Decay Rate Method

This test is used to determine the infiltration rate at a specific pressure difference. A known amount of tracer gas is released in a predetermined building volume. It is allowed to mix thoroughly throughout the volume and samples are collected at regular intervals at a number of similar locations. These samples are analysed using portable gas chromatograph, preferably immediately after having been obtained. The infiltration rate is determined by the rate of tracer gas decay. Decay of tracer gas is proportional to the amount of fresh air entering the volume.

To obtain further infiltration rates for different pressures, the test has to be repeated. This test is time consuming and laborious. Dependent on the size and complexity of the test building, it requires three to four hours to carry out and an additional four to six hours to analyze the data.

This method is required when buildings are too large or complex to be tested using the fan pressurization method. In buildings where a choice is possible, air infiltration testing using the tracer gas decay method for different pressure differentials may be carried out to compare with fan pressurization and depressurization air leakage test results.

External calibrated fans can be used to produce an even pressure differential throughout tracer gas tests while being monitored with pressure transducers and strip chart recorders.

Interior and exterior thermographic inspections can be conducted while a building is being depressurized (or pressurized) for purposes of air infiltration testing.

3.3.2 Equipment

3.3.2.1 For Induced Pressure Method Using Calibrated Fans

- NRC fan: vane axial type with variable–pitch blade manually adjustable to obtain flow rates between 0 and 19.5 m^3/s (0 to 42,500 cfm)

- 8 sections of .9 m (34") diameter ducts, 2.5 m (8'–0") long
- 600 V, 60 A gas generator to power fan,
- Variac variable voltage transformer to regulate power from generator to fan
- one flat bed trailer (10 m) to transport fan, generator and tubing (if building is located outside of Ottawa)
- 1200 x 2400 x 18 mm (4' X 8' X 3/4") plywood sheets, (construction grade) for supports of ducting and door seal
- 38 mm (1 1/2") nails
- tie wire, to secure plywood to framing around louvre frames
- plywood sheets 1200 x 2400 x 13 mm (4' x 8' x 1/2") to seal louvres
- 50 x 100 mm (2 x 4") pine for framing of seals
- 12 x 25 mm closed cell neoprene, adhesive one side
- duct tape to seal plywood plugs around door frame

Refer to section 3.2.1 and 3.2.2 for equipment used to obtain pressure differential measurements during air leakage testing.

3.3.2.2 Tracer Gas Decay Rate Method

Refer to section 3.3.2 in document D37 – Measurement of Outdoor Air Supply Rate for required equipment.

3.3.3 Detailed Measurement Procedure

The size of a building and the uncertainty of its air tightness characteristics, make it difficult to determine if calibrated fans are of sufficient size to generate adequate pressure differentials. The calibrated fan is tested prior to air tightness testing, to determine maximum pressure differentials at maximum flow rate. Testing indicates maximum fan flow rate and maximum pressure differentials. If during preliminary testing, indications are that the fan cannot generate sufficient pressure, the use of building exhaust fans to generate required pressure differentials for both the depressurization test using the calibrated fan and the tracer gas test is possible. To carry out an accurate tracer gas test, the fan pressurization test should achieve at least a 50 Pa pressure differential through the enclosure. This allows for at least 5 flow rate readings at 10 Pa differences to be obtained. Even in mild wind conditions, pressure differentials across the enclosure can fluctuate as much as 3 to 5 Pa. This introduces an error factor of as much as 50% in readings taken at 10 Pa.

3.3.3.1 Fan Pressurization Method

The fan pressurization method requires the use of a calibrated fan. If existing mechanical system fans cannot be calibrated and used to determine flow rates for specific pressure differentials, then external calibrated fans are required. The only available fan in Canada, capable of generating sufficient pressure in large buildings, is owned and operated by the Institute for Research in Construction at the National Research Council. This fan is a vane axial type with a variable pitch blade that is manually adjusted to obtain flow rates from 0 to 19.5 m^3/s (0 to 42,500 cfm). It requires 600V 60A power, obtained from either main electrical feeders in the test building or from an electrical generator.

The fan intake is connected by a .9 m diameter duct to an 18 mm thick plywood panel in an entrance door frame.

A portable pressure meter with a diaphragm type pressure transducer (static error band of 5% full scale) and a digital voltmeter are used to monitor the pressure and air flow readings. Pressure readings are obtained from tubes located inside the building which extend to exterior envelope surfaces. Air flow rates are measured upstream of the fan intake using total pressure averaging tubes for high air flow rates and an orifice plate for low air flow rates. Both these readings are recorded on a strip chart recorder.

Typical procedures are as follows:

1. Set up fan at a building entrance connected to a central circulation route or an area open to a large portion of the building. This will allow for a more even pressure distribution throughout the building and a quicker response to pressure changes.
2. Seal supply and relief air louvres when all exhaust fans are off. Use plywood plugs for pressurization testing, and 4 or 6 mil polyethylene sheeting for depressurization testing. Turn on all exhaust fans and measure the average pressure differential.
3. Individually turned off exhaust fans and identify the corresponding pressure drop on the strip chart.
4. After exhaust fans are turned off and exhaust louvres sealed, turn on calibrated fan to a flow rate producing the same pressure differential as that produced by all exhaust fans. Record both flow rates and average pressure differentials data on a strip chart recorder. This procedure calculates the flow rate that the exhaust fans produce when fully operational.
5. Adjust the calibrated fan to produces similar pressure differentials recorded when each exhaust fan was turned off. This allows for verification and calibration of individual exhaust fan flow rates.
6. With the supply, exhaust and relief air louvres sealed, carry out pressurization and/or depressurization air tightness testing in the following manner:
   - at a maximum flow rate, and at pressure differentials of 50, 40, 30, 20 and 10 Pa with all mechanical systems turned off. The base pressure reading is recorded when the calibrated fan is turned off.
   - at a maximum flow rate, and at pressure differentials of 50, 40, 30, 20, and 10 Pa with mechanical systems on full recirculation. The base pressure reading is recorded when the calibrated fan is turned off. Individually remove plugs from mechanical louvres when mechanical systems are either off or in the full recirculation mode, and the calibrated fan on maximum flow. Recorded corresponding pressure drops. Close all supply and exhaust dampers through the central control computer prior to removal of seals. This effectively calibrates the air leakage through each of the mechanical louvres.
7. The air tightness of the envelope and mechanically closed louvres, is identified when all seals are off the mechanical louvres and the fan is at maximum flow rate. Note operation of the building systems to determine base pressure. If in

the recirculation mode, turn off mechanical systems and identify resulting data on the strip chart.

8. Individually tighten mechanical louvres by hand and monitor corresponding pressure differentials. The same conditions as the previous test still prevail. This will determine the air leakage through supply and exhaust air dampers. If the mechanical systems are off during this testing, then turn them on to full recirculation and identify resulting data.

In order to convert the air leakage data from fan pressurization tests to air infiltration rates the following procedures are necessary:

1. Conduct the fan pressurization test as outlined above.
2. Calculate C and n values in equation (3) from test data.
3. Calculate C_i for one typical floor from the equation:

$$C_i = \left(\frac{A_i}{A}\right) \times C$$

where A_i = area of exterior wall of one floor
A = area of exterior wall of building
C_i = flow coefficient of one typical floor

4. Set mechanical system at a specific operating mode.
5. Measure the average pressure difference across the envelope of one floor (ΔP_i).
6. Calculate the air leakage rate for this floor from the equation:

$$I_i = C_i \times \Delta P_i^n$$

where I_i = air leakage for i floor
C_i = flow coefficient for floor
ΔP_i = average pressure difference across envelope of floor

7. Repeat steps 5 and 6 for every floor.
8. calculate the total air infiltration rate from the equation:

$$I = \Sigma I_i$$

Note that I is the total air infiltration rate of the building under the operating mode of the mechanical systems and weather conditions when pressure measurements were conducted. Step 8 has to be repeated to cover several different weather conditions. The tracer gas decay rate test will also produce the total infiltration rate as in step 8. These two results can be compared only for identical conditions.

Refer to sections 3.2.3.1, 3.2.3.2 and 3.2.3.3 for detail procedures regarding pressure monitoring during these test procedures.

3.3.3.2 Tracer Gas Decay Rate Method

1. Check out fans used to generate pressure within the building. Label samples for distribution. Hand out floor plans showing seeding and sampling locations to personnel. Set up and calibrate gas chromatograph equipment needed to analyze samples.

2. Turn off mechanical systems. Close exhaust dampers prior to seeding. Plug and seal mechanical louvres. Use polyethylene sheets for depressurization testing and do not seal exhaust louvres. A more structurally rigid material is used (generally plywood) for pressurization testing.
3. Lay out prior to testing areas to be sampled. Relate areas to mechanical system zoning.
4. Seed identified floor areas. Seed total building volume to a concentration of approximately 15 to 20 ppm. The building volume is multiplied by the required tracer gas concentration to determine gas concentration.

$$\frac{BV \times (a) \times (1000\ 1/m^3)}{1{,}000{,}000} = TGV \qquad (4)$$

where BV = building volume (m^3)
a = concentration of tracer gas (parts per million)
TGV = tracer gas volume (litres)

To convert the volume of tracer gas to weight the equation used is:

$$Dtg = \frac{P \times GMW}{R \times T} \qquad (5)$$

where Dtg = density of tracer gas (grams/litre)
P = pressure (atmosphere)
GMW = gram molecular weight (gram/mol)
T = temperature (oK)
R = universal gas constant (0.082056 x litre x atmosphere) mol x degree Kelvin

This will determine the amount of tracer gas in weight that will be required to obtain a specific concentration for the start of the tracer gas test. This concentration is verified with the analysis of the first samples taken immediately after the building is pressurized or depressurized.

5. When seeding is complete, leave tracer gas to distribute within seeded areas for 15 minutes before turning on mechanical systems to full recirculation mode. Pressurize building to desired level and leave at setting for duration of tracer gas test. Take first samples at start of pressurization. Collect a minimum of five and preferably six sets of samples at half hour intervals.
6. Analyze samples. Study data from this analysis after each set of samples to ensure valid results were obtained. Carry out analysis of decay rates for different zones and entire building volume after field trip.

For procedures used to set up the gas chromatograph equipment, sampling technique and analysis of the samples, refer section 3.3.3 in document D37 – Measurement of Outdoor Air Supply Rate.

3.3.3.3 Use of Calibrated Fan During Tracer Gas Testing

Generally tracer gas testing is conducted when test buildings cannot be tested with calibrated fans. Calibrated fans can be used to induce pressure within the building. The advantage to their use in this test procedure is that they can not only produce higher pressure differentials but a range of pressures that can simulate normal building operations.

In these situations the general procedures are as follows:

1. After seeding, run the external calibrated fan for two or more hours at one constant pressure. Take samples in the seeded areas at half hour intervals.
2. When completed, seed building again. Take another set of samples in same manner, at same locations, at different pressure differential.

During heating seasons, pressurization testing reduces the possibility of freezing interior plumbing and is recommended over depressurization testing. During tracer gas testing at high pressure differentials (40 Pa and greater), the frequency of samples can be reduced due to greater decay rates.

3.3.3.4 Pressure Monitoring During Tracer Gas Testing

Due to the length of air leakage tracer gas testing, set up of ideal conditions to monitor pressure differentials are required. If individual pressure taps are in place, manual pressure readings can be taken periodically (15 minutes) and recorded on blank output sheets. This pressure data is referenced to wind data gathered on site and used to determine wind loading effects on the enclosure.

Average pressure differential of the main elevations is monitored by pressure transducer and recorded on a strip chart recorder along with the flow rate generated by the calibrated fan. The average pressure data is referenced to the individual pressure readings to determine variances between extremes and the norm.

3.3.3.5 Thermographic Inspections During Tracer Gas Testing

Air leakage tracer gas testing also offers ideal conditions to conduct thermographic inspections of the building enclosure under monitored high pressure differential conditions. While the building is depressurized, thermographic inspection of the exterior walls from the interior will easily identify areas of abnormal air leakage.

If the building is pressurized during air leakage testing, exterior inspections will identify locations of abnormal leakage through the enclosure. For greater detail refer to Document D38, Thermographic Inspections of Building Enclosures; and specifically the sections dealing with thermographic inspection during air leakage testing.

3.3.4 Analysis and Assessment

3.3.4.1 Induced Pressure Method

The air leakage characteristics of a building are defined using the equation:

$$q = C\ (\Delta P)^n \qquad (3)$$

where q = overall air leakage rate/unit area of exterior wall, L/s.m²
C = flow coefficient, L/s.m².(Pa)n
ΔP = pressure difference across exterior wall, Pa
n = flow exponent, (between .5 and 1.0)

The flow exponent is a function of pressure differential and its value will vary from building to building. It ranges from .5 corresponding to orifice flow to 1.0 which is indicative of laminar flow. An average value is .65 determined to be representative of many cases of wall and window leakage. The value for the flow coefficient 'C' can be normalized to the power .65 for purposes of comparison of similar type buildings.

Through their testing, NRCC has determined a flow coefficient 'C' range from .30 (tight) to .70 L/s.m² (Pa).65 (loose) for schools, the average being .50 L/s.m² (Pa).65. The flow coefficient for high rise office buildings ranged from .09 to .36 L/s.m² (Pa).65, average being .22 L/s.m² (Pa).65. The obtained values for test buildings should be compared to these values.

To determine air leakage through the envelope as a reference point for the measured values, the effects of wind and stack effect are calculated by the formulae listed below. Wind speed and direction data are collected by a weather station on the building roof.

Air Leakage Caused by Wind

When wind is normal to the building face, pressures are positive on the windward side and negative on the other three sides. Other more complicated pressure distribution patterns occur with winds hitting a building on a diagonal or in irregular shaped buildings. Interior pressures adjust so that air flow into the building equals the air flow out. This air flow is determined by the exerted wind pressure. The dynamic pressure of the reference wind is calculated by;

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \qquad (7)$$

where q = dynamic pressure of reference wind (Pa)
ρ = mass density (kg/m³)
V = reference wind speed (m/s)
V = $0.37\ V_S\ (Z)^{0.25}$ for terrain with many low buildings
V = $0.178\ V_S\ (Z)^{0.36}$ for terrain with many tall buildings
V_S = wind speed at 10m at the weather station
Z = height in metres

Air Leakage Caused by Stack Effect

The pressure difference at a distance (h) from the neutral pressure level is given by;

$$Ps = .0342\ h\ Pt\ \left(\frac{1}{To} - \frac{1}{Ti}\right) \qquad (8)$$

where Ps = pressure due to stack effect (Pa)
h = height of building
Pt = barometric pressure (Pa)
To = outside temperature (K)
Ti = inside temperature (K)

Infiltration due to stack effect:

In high–rise buildings, infiltration generally occurs in the lower floors when interior to exterior temperature difference is great during winter months. Infiltration can be determined by the equation;

$$Q = 0.96\ C\ S\ (\gamma \Delta T/To)^{0.85}\ H^{1.85}\ .\ (m^3/S) \tag{9}$$

where
- Q = infiltration through exterior envelop (m^3/s)
- C = air leakage coefficient for exterior walls
- S = perimeter of the building
- γ = thermal draft coefficient (0.8)
- ΔT = temperature difference, inside to outside
- To = outside temperature
- H = height of building

Air Leakage Due to Combined Effects:

Pressure differences producing air leakage are created by wind, stack effect and pressures generated by mechanical systems. When two or all of these factors occur at the same time, the total pressure differences are determined from the algebraic sum of the pressure differences produced by each individually. NRCC studies identified the relationship between wind and stack effect in air infiltration by the equation;

$$\frac{Qws}{Qlrg} = 1 + 0.24 \left[\frac{Qsml}{Qlrg}\right]^{3.3} \tag{10}$$

where
- Qws = infiltration rate from combined effects
- $Qlrg$ = larger of Qw and Qs
- $Qsml$ = smaller of Qw and Qs

Test procedures produce air flow rates for specific corresponding pressure levels. This data is input into a curve fit program based on equation (3) and the "C" and "n" values are determined using least squares regression analysis. This data is plotted on a graph along with the calculated values for "C" and "n".

Flow Rate Calculations

The flow rate calculations are based on air leakage curves calculated from measured flow rates and pressure differences taken from calibrated fan readings. The curve is generated using a curve fit routine with the following equation:

$$y = I\ (x^n) \tag{11}$$

where
- y = flow rate
- x = pressure differential through the exterior wall, Pa
- n = flow exponent (calculated by curve fit routine)
- I = integer calculated by curve fit routine

Since I and n are known from the air leakage curve, this equation can be used to calculate a series of flow rates from any given pressure differential (Pa).

Air Change Rates

The equation to calculate the air change rate for a building is:

$$ACH = \frac{Q\ (m^3/s) \times 60 \times 60}{\text{building volume } (m^3)} \quad (12)$$

where Q = the flow rate determined from the above air leakage curve
ACH = air changes of total building volume per hour

Air Leakage Rates

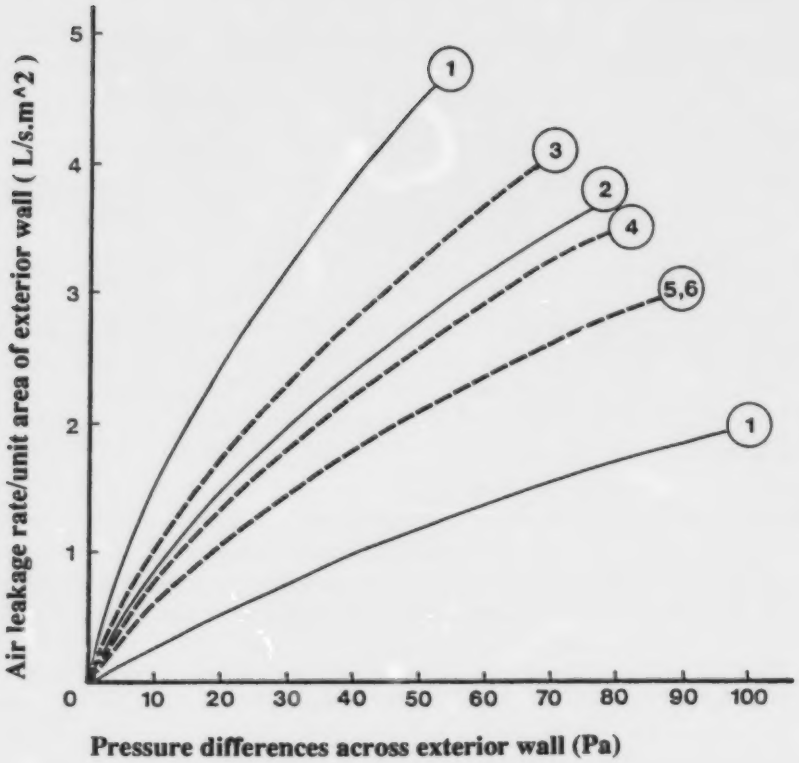
Air leakage rates are generally calculated for exterior wall areas only. Roof areas are assumed to be relatively air tight. The calculated wall areas can include the exterior walls of mechanical penthouses when large duct spaces penetrate the mechanical rooms from the occupied areas. Only pressurized spaces should be included in the calculation of wall area. For each pressure level, the air leakage rate can be given by;

$$Qa = \frac{Qb}{A} \quad (13)$$

where Qa = air leakage per unit of building enclosure ($l/s/m^2$)
Qb = total building air leakage (l/s)
A = total pressurized wall area (m^2)

The air leakage rate with mechanical louvres closed and mechanical systems on and off is calculated. These rates are compared to NRCC air leakage curves (see FIGURE 3.3.1).

The air leakage data is generally normalized to a zero temperature differential from interior to exterior. In tests conducted when delta 'T' is less than 15°C, the correction factor is not large and has minimal effect on the air leakage curve.



1....UPPER AND LOWER LIMIT, air leakage rate of high rise building.
2....AVERAGE, air leakage rate of high rise buildings.
3....BUILDING AIR LEAKAGE RATE, enclosure and mechanical louvres closed automatically, systems on.
4....BUILDING AIR LEAKAGE RATE, enclosure and mechanical louvres closed manually, system on.
5....BUILDING AIR LEAKAGE RATE, enclosure and mechanical louvres, system off.
6....BUILDING AIR LEAKAGE RATE, enclosure only, system on.

FIGURE 3.3.1
AIR LEAKAGE CURVES

For accurate results it is assumed that a uniform temperature has been maintained in the building. Also, the maximum pressure variation due to stack effect or wind effect was no more than 10% of the measured average pressure difference. Greater variances in these parameters causes greater errors in data from lower pressure differential levels. In these situations, elimination of data at lower levels provides more accurate air leakage results.

Air leakage curves determined by this testing are used to define the air tightness characteristics of the enclosure. This information, when used in an energy analysis program, can determine the additional heating and cooling load required in perimeter zones to offset this air infiltration.

3.3.4.2 Tracer Gas Method

Analysis is conducted in the field using procedures listed in section 3.3.3 of document D37 – Measurement of Outdoor Air Supply Rate. Analysis of the samples can be carried out in the lab but generally carried out on site to reduce potential errors (e.g., undetected error in sample label, omission of critical data on sample label, etc.).

Results of the samples taken from separately seeded zones are analyzed using a least squares linear curve fit program. The input consists of different concentrations of tracer gas at the different time intervals (usually 20–30 minutes). The program converts the values into a logarithmic scale and plots them. It then uses least square regression analysis to find the equation which will best draw a straight line through the plotted points. The slope of the line is the average decay rate for the samples analyzed. Decay rates are calculated separately for different pressures. Air change rates for tested pressures are determined by decay rates.

3.3.5 Resource Allocation and Timing

3.3.5.1 Induced Pressure Method

This method requires a team leader (a professional), a technician to operate the calibrated fan, a mechanical engineer to verify specific operational set–ups of the mechanical systems, a building operator to set mechanical systems in required operational modes, and numerous technicians and hired hands to seal and unseal mechanical system louvres.

Analysis and documentation of air leakage data provided by this method requires one to two person weeks. This is presuming that other related information on air leakage has been accumulated, investigated and cross referenced with the data from this test method.

Refer to section 3.4.5.4 for the resource allocation and timing required for pressure monitoring associated with this method.

3.3.5.2 Tracer Gas Method

This test method requires at least a team leader (a professional), two persons to carry out air sample analysis (a chemist and a technician) and a building operator to ensure specific pressure conditions within the building. The number of people required to seed and collect air samples is dependent upon the size of the building and the method used to carry out these activities. Generally three to ten people are required for these activities (technicians or possibly hired hands). If the building is pressurized by means of an external fan, a technician for the fan is required throughout the testing.

Due to complexity of test methodology, approximately one to two person weeks (team leader and chemist) are required to plan and set up equipment that is required for testing. Three to five person–days are necessary for test and equipment set–up in the

field (team leader, chemist and technician). Seeding and sampling require approximately six hours per tracer gas test at one pressure level and an additional three to four hours for additional testing at different pressure levels. These times are multiplied by the required manpower to carry out the activities to determine the total person–hours. Analysis of air samples requires between eight to sixteen person–hours per test.

Analysis and documentation of air samples, decay rates for specific locations and for the complete building, and calculation of air change rates require 1 person week. This is dependent upon the number of samples and the detail of analysis required.

Refer to sections 3.4.5.1, 3.4.5.3, and 3.4.5.4 for resource allocation and timing that is required for pressure monitoring associated with this test method.

3.3.5.3 Transdisciplinary Implications of Air Leakage Testing

It should be noted that other testing can be carried out as peripheral tests associated with air leakage and air infiltration testing. If a calibrated fan is available for air leakage testing, it can also be used to produce the required pressures for thermographic inspections, tracer gas infiltration testing, and calibration of building exhaust fans. Various forms of pressure monitoring and thermographic investigation can be conducted during tracer gas infiltration testing. This interrelationship of testing can be utilized to reduce the time required and number of people necessary to carry out each of the tests separately. The test procedures, as carried out in this section are very labour intensive and only a few activities can be automated.

Since the building mechanical systems and the operating conditions of the building are altered for the duration of the air leakage test, simultaneous testing in the following disciplines is not advised: air quality, thermal comfort, mechanical system monitoring, pollution migration testing, electrical system testing, and acoustics (ambient noise levels of work spaces).

Testing that is not affected by the operational requirements of the air leakage testing include: thermographic inspection of the enclosure, acoustic monitoring of the building noise with the mechanical systems off, functional use analysis and inspection of the operation of the mechanical dampers, and building lighting measurements.

Since the operation of the mechanical systems will have to be altered, testing has to be scheduled for the off–hours. Air quality team members are required for analysis of samples. Mechanical systems team members are required for set up and inspection of the mechanical systems during the testing. Other support members are required to seed the building, collect samples, install plugs in the supply, relief and exhaust louvres, carry out thermographic inspections, operate the calibrated fan and obtain pressure measurements.

Thermal comfort measurements are affected by air leakage testing, and mechanical system testing but not affected by pressure differential monitoring of normal operating condition. Therefore, thermal comfort measurements are not conducted during air leakage testing or mechanical system testing that alters the normal operation of building at any time.

3.3.6 Documentation: Creation and Retention of Working Papers

3.3.6.1 Induced Pressure Method

Air flow and pressure readings are recorded onto a strip chart recorder as mentioned in sections 3.4.6.1 and 3.4.6.4. This information is included as an appendix to the air leakage report. A chart of the test data is produced. Air leakage curves are developed using this charted data. Information relating to parameters describing air leakage characteristics are determined using this data. These discussions are included in the air leakage report.

3.3.6.2 Tracer Gas Method

Analysis of air samples are recorded on a gas chromatograph analyzer and a strip chart recorded. These results are pasted onto a blank output sheets which are photocopied for entry into an appendix. A chart of the area sizes and other required sample data is created and inserted into the same appendix. This data is then used to determine the decay rates for specific samples and volumes. The computer analysis of this data entered into the appendix along with the findings and conclusions.

4. REFERENCES

Liddament, M.,and Thompson, C.; **Techniques and Instrumentation for the Measurement of Air Infiltration in Buildings – A Brief Review and Annotated Bibliography**; Technical Note AIC 10; May 1983.

Hutcheon, N.B., and Handegord, G.O.P., **Building Science for a Cold Climate**, John Wiley and Sons, Toronto, 1983.

Ma, W.Y.L., **The Average Pressure Tube Flowmeter for the Measurements of the Rate of Airflow in Ventilating Ducts and for the Balancing of Airflow Circuits in Ventilating Systems**, J.I.H.V.E., Feb. 1967, pp 327 – 348.

Shaw, C.Y., and Jones, L., **Air Tightness and Air Infiltration of School Buildings**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 85, Part 1, 1979.

Shaw, C.Y., **Airtightness: Supermarkets and Shopping Malls.** ASHRAE JOURNAL, March 1981.

Shaw, C.Y., **Airtightness: Supermarkets and Shopping Malls**, ASHRAE JOURNAL, March 1981.

Shaw, C.Y., and Tamura, G.T., **Mark xi Energy Research Project, Air Tightness and Air–Infiltration Measurements**, Building research Note Number 162, NRC, June 1980.

Shaw, C.Y., and Tamura, G.T., **Studies of Exterior Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 82, Part 1, 1976.

Shaw, C.Y., and Tamura, G.T., **The Calculation of Air Infiltration Rates Caused by Wind and Stack Action for Tall Buildings**, Vol. 83, Part 2, ASHRAE TRANSACTIONS, 1977. pp 145 – 158.

Tamura, G.T., **The Calculation of House Infiltration Rates**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 85, Part 1, 1979.

Tanaka, H., and Lee, Y., **Combined Effect of Wind, Temperature and Mechanical Ventilation on Pressure Differentials**.

5. APPENDICES

5.1 STANDARD TERMS AND UNITS OF MEASUREMENT

Air Change Rate The air change rate is the ratio of the volumetric rate at which air enters (or leaves) a volume divided by that volume. Expressed as air changes per hour (ACH)

Air Flow Rate The volume tric rate air movement either within or through the walls of an enclosure. The mass rate of air movement either within or through the walls of an enclosure.

Air Infiltration The uncontrolled inward air leakage through cracks and interstices in any building element and around doors of a building, caused by the pressure effects of mechanical systems, wind and/or differences in the indoor and outdoor air density, measured as air change rate.

Air Pressure The pressure exerted by air. This may refer to static (atmospheric) pressure or dynamic components of pressure arising from air flow, or both acting together.

Anemometer A device used for measuring air or gas movement.

Building Tightness: General Volume flow rate or airchange rate for a specific building at specified elevated pressures, used to characterize its airtightness.
Specific The volumetric flow rate or air change of a building at a specific pressurization level and temperature differential with all proposed openings sealed.

Capacitance Pressure Transducer A variable capacitance pressure sensor. The sensing element, a metal diaphragm, acts as one plate of a capacitor. When pressure is applied it moves with respect to a fixed plate, changing the thickness of the dielectric between. The resulting circuit is monitored using a bridge circuit.

Decay Method The sampling of air in an interior building volume seeded with a tracer gas of a known concentration. The rate of tracer gas decay over time is used to determine the rate of air movement through the exterior enclosure.

Depressurisation The creation of a static pressure deficit within the building interior in relation to the exterior. For test purposes, achieved by mechanical means by installation of a calibrated fan or by building mechanical systems. The flow rate through the fan and across the envelope are measured and air leakage of a building or a component is assessed.

Flow Coefficient The term C in the commonly used flow equation:

$$Q = C.(\Delta P)^n$$

Q = volumetric flow rate of air

ΔP = pressure difference across the building envelope
n = flow exponent
C = value of flow rate for P=1Pa

Flow Exponent n varies from 0.5 (turbulent flow) to 1.0 (laminar flow) in the above equation

Magnahelic Gauge A compact dial gauge of limited accuracy for measuring differential pressures. The active element is a twisted bourdon tube with a flat magnetic armature attached which rotates when pressure is applied, thus changing the air gap between it and the sensing circuit, changing the inductance. The resultant signal is used to modulate a carrier voltage.

Manometer A device for measuring pressure employing the principle of displacement of liquid levels in a liquid filled "U" tube. The limbs of the "U" may be vertical, inclined or curved.

Negative Pressure A pressure below atmospheric.

Neutral Zone (Neutral Pressure Plane) An area where no (mean) pressure difference exists between inside and outside a building.

Positive Pressure A pressure above atmospheric.

Pressurization Method A method of testing for air leakage of a building or component by building mechanical systems or installing a calibrated fan in the building envelope, and creating a static pressure excess inside the building. The flow rate through the fan and pressure difference across the envelope are measured and air leakage assessed.

Stack Effect Pressure differential across a building caused by differences in the density of air due to an indoor–outdoor temperature difference.

Steady State The maintenance of constant pressure and temperature conditions over a specific time period to allow for constant air movement and heat loss through a building enclosure.

Turbulent Flow Flow in which cross–stream momentum transfer is dominated by bulk motion of the fluid in the form of random eddies.

5.2 APPLICABLE AUTHORITIES AND REGULATIONS

1. CGSB Standard CAN/CGSB 149.10–M86

   Specifically written for contractors testing for air leakage in residential and small commercial structures. The maximum size of commercially available calibrated fan units is presently 5,000 cfm.

   Based on a very low air leakage rate of .25 air changes per hour, the maximum size of structure that could be tested with these units is approximately 100,000 sq. ft. As the leakage rate increases, the size of the structure which can be tested decreases proportionally.

2. CEGEMC Guidelines Sept. 1981

Restrict infiltration to 0.5 A/C per hour within the perimeter 4 m of a building at a pressure differential of 100 Pa.

3. ASTM Standard E779–81

Air leakage standard specifies use of both pressurization and depressurization during testing to average the differences in flow coefficients and exponents due to the changing flow directions through enclosures.

5.3 BUILDING PERFORMANCE EVALUATION DOCUMENT LIST

Documents in this series have been divided into four classes. Class A documents describe the use of documents in the other three classes. Class B is a catalogue of tests which includes an index and cross reference list. Class C documents provide an overview of the three performance areas and summarize the Class D documents in the respective area. Class D documents contain descriptions of performance attributes and detail means of assessing those attributes.

	A1	Project Manager's Guide
	A2	Property Manager's Guide
	B1	Catalogue of Tests
Overviews:	C1	Environmental and Energy Performance
	C2	Functional Performance
	C3	Systems and Material Performance
Environmental and Energy Performance	D01	Pollutant Evaluation
	D02	Pollution Migration
	D03	Thermal Environment Evaluation
	D04	Global Evaluation: Energy Performance
	D05	Component Evaluation: Energy Performance
	D06	Equipment and Systems Evaluation: Energy Performance
	D07	Retrofit Evaluation: Energy Performance
	D08	Acoustic Environment Evaluation
	D09	Air Circulation Evaluation
	D10	Illumination Evaluation
	D11	Weather Data Collection
Functional Performance	D20	Record and Archive Analysis
	D21	Plan Annotation
	D22	Focused Interviews
	D23	Questionnaires
	D24	Observation
Systems and Material Performance	D30	Structural Walls and Columns: Condition Survey
	D31	Structural Slabs and Roofs: Condition Survey
	D32	Parking Garages: Condition Survey
	D33	Mechanical Systems Evaluation
	D34	Mechanical Controls Evaluation
	D35	Electrical Systems Evaluation
	D36	Airtightness and Pressure Monitoring
	D37	Measurement of Outdoor Air Supply Rate
	D38	Thermographic Inspections of Building Enclosures
	D39	Thermal Resistance Measurement
	D40	Moisture Content Inspections
	D41	Roofing Systems Evaluation

Travaux publics Canada
Services d'architecture et de génie

Public Works Canada
Architectural and Engineering Services

Série sur l'évaluation du rendement des immeubles

Contrôle de la pression et de l'étanchéité à l'air

Document D36

Canada

Série sur l'évaluation du rendement des immeubles

Contrôle de la pression et de l'étanchéité à l'air

Document D36

SAG 1-4:86-45

mars 1988

Le ministre des Travaux publics ne fait aucune recommandation ni n'endosse sous quelque forme que ce soit, exprimée ou tacite, cette publication ou les programmes ou l'information qu'elle contient quant à leur qualité, leur commercialisabilité, leur pertinence pour une fin particulière ou leur capacité à produire un résultat quelconque. En aucun cas, le Ministre ou Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, ses employés, fonctionnaires ou agents gouvernementaux ne peuvent être tenus légalement responsables à l'égard de quiconque pour tout préjudice direct, indirect ou découlant de l'utilisation de ladite publication ou des programmes ou de l'information qui y sont contenus.

Publiés par division du rendement des immeubles
Travaux publics Canada

Travaux publics Canada / Public Works Canada

FICHE SIGNALÉTIQUE DE DOCUMENT

1. Titre du document CONTRÔLE DE LA PRESSION ET DE L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR	2. Numéro de contrôle AES/SAG 1-4:86-47
	3. Date mars 1988
4. Auteur(s) A. Colantonio	5. No de réf. du conseil
6. Chargé de projet	7. No de la collection technique D36
8. Nom et adresse de l'organisme rédacteur Division du rendement des immeubles, T.P.C. Local C-548, Édifice Sir Charles Tupper Promenade Riverside, Ottawa, Ontario, K1A 0M2 Téléphone : (613) 998-7830	9. Type de document Lignes directrices
	10. Nombre de pages 44
11. Nom et adresse de l'organisme promoteur Technologie du design, de la construction et de l'immobilier Programmes de soutien à la gestion immobilière fédéral Logement	12. No de dossier de TPC A4270-16
	13. No de projet de TPC 602055
14. Notes Toutes questions ou commentaires doivent être dirigés à l'organisme rédacteur, se référer à 8 ci-haut.	15. No de publication de ASC
	16. ISBN

17. Résumé

Les fuites d'air contribuent largement aux besoins de conditionnement de la plupart des grands immeubles.

Les études effectuées par TPC de la Serie sur l'évaluation du rendement des immeubles qui traitent des caractéristiques des fuites d'air font parties du concept plus général de rendement des immeubles et ont été élaborées pour répondre au besoin d'une analyse plus poussée de la consommation d'énergie des immeubles existants.

Ce document passe en revue les méthodes employées par TPC pour déterminer les caractéristiques d'échanchéité à l'air et les taux d'infiltration d'air pour plusieurs différences de pression.

La première méthod est l'utilisation de ventilateurs étalonnés pour pressuriser ou dépressuriser un immeuble afin de déterminer ses caractéristiques d'étanchéité à l'air pour plusieurs différences de pression.

Dans le cas d'un très grand immeuble, il faut recourir à la méthodes de mesure par diminution de la concentration de gaz traceurs pour obtenir les taux d'infiltration d'air pour les principaux modes de fonctionnement des installations de ventilation mécanique et pour les différences de pression qui en resultent.

18. Diffusion Exemplaires disponibles: Centre de documentation Services d'architecture et de génie Travaux publics Canada Édifice Sir Charles Tupper Promenade Riverside Ottawa, Ontario K1A 0M2	19. Mots clés	
	20. No de catalogue du centre de documentation BP D36B	21. Prix

TABLE DES MATIÈRES

1.	**INTRODUCTION**	*1*
1.1	But et objectifs	*1*
1.2	Généralités	*2*
2.	**DÉLIMITATION DU SUJET**	*5*
2.1	Cadre général	*5*
2.2	Limites des techniques de mesure	*6*
3.	**MÉTHODOLOGIE**	*9*
3.1	Étape I – Évaluation préliminaire	*9*
3.1.1	Description des techniques	*9*
3.1.2	Équipement	*10*
3.1.3	Marche à suivre	*11*
3.1.4	Analyse et évaluation	*12*
3.1.5	Affectation des ressources et calendrier	*13*
3.1.6	Documentation : création et archivage des documents de travail	*13*
3.2	Étape II – Techniques de mesure simples	*14*
3.2.1	Description des techniques	*14*
3.2.2	Équipement	*15*
3.2.3	Méthode de mesure détaillée	*15*
3.2.4	Analyse et évaluation	*20*
3.2.5	Affectation des ressources et calendrier	*22*
3.2.6	Documentation : création et archivage des documents de travail	*24*
3.3	Étape III – Techniques de mesure spécialisées	*24*
3.3.1	Description des techniques	*25*
3.3.2	Équipement	*26*
3.3.3	Méthode de mesure détaillée	*27*
3.3.4	Analyse et évaluation	*32*
3.3.5	Affectation des ressources et calendrier	*37*
3.3.6	Documentation : création et archivage des documents de travail	*39*
4.	**RÉFÉRENCES**	*40*
5.	**ANNEXES**	*41*
5.1	Terminologie et unités de mesure	*41*
5.2	Normes applicables et organismes de réglementation	*43*
5.3	Liste de documents évaluant le rendement des immeubles	*44*

LISTE DES FIGURES

3.3.1	Courbes de fuite d'air	*36*

1. INTRODUCTION

Les fuites d'air (infiltrations et exfiltrations) contribuent largement aux besoins de conditionnement (chauffage et climatisation) de la plupart des grands immeubles. De plus, elles constituent un facteur de pollution non négligeable en permettant à l'air non traité de pénétrer dans un immeuble. Les pertes de chaleur dues aux défauts d'étanchéité de l'enveloppe d'un immeuble de bureaux peuvent parfois atteindre 40 % de la chaleur totale nécessaire dans la plupart des climats du pays.

Les fuites d'air peuvent être difficiles à chiffrer. Elles dépendent non seulement de facteurs internes comme l'étanchéité et la configuration de l'immeuble, les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur, les effets des installations de ventilation mécanique (l'appoint d'air neuf), mais aussi de facteurs externes comme la vitesse du vent, l'orientation et les immeubles voisins.

Les études effectuées par TPC de la Série sur l'évaluation du rendement des immeubles qui traitent des caractéristiques des fuites d'air font partie du concept plus général de rendement des immeubles et ont été élaborées pour répondre au besoin d'une analyse plus poussée de la consommation d'énergie des immeubles existants. Les conclusions de ces études permettent de répondre à d'autres questions relatives aux taux de renouvellement d'air par ventilation mécanique, à la qualité de l'air intérieur et au confort thermique à proximité des murs extérieurs et des fenêtres.

Les fuites d'air importantes par l'enceinte sont souvent la cause d'une surconsommation d'énergie, de dégradations dans les zones de fuites anormales subissant des condensations répétées et de difficultés de contrôle de la température des aires périphériques. Les données ainsi obtenues ainsi que les résultats des autres méthodes d'essai (inspections par thermographie) permettent d'étudier la faisabilité et la rentabilité des mesures correctives. Elles permettent aussi de savoir si l'immeuble est conforme aux normes actuelles de TPC.

1.1 BUT ET OBJECTIFS

Les méthodes suivantes sont employées par TPC pour déterminer les caractéristiques d'étanchéité à l'air et les taux d'infiltration d'air pour plusieurs différences de pression.

a) L'utilisation de ventilateurs étalonnés pour pressuriser ou dépressuriser un immeuble afin de déterminer ses caractéristiques d'étanchéité à l'air pour plusieurs différences de pression.

b) Dans les très grands immeubles, les ventilateurs étalonnés ne peuvent pas toujours produire les différences de pression nécessaires à travers l'enveloppe. Il faut alors recourir à la méthode de mesure par diminution de la concentration de gaz traceurs pour obtenir les taux d'infiltration d'air pour les principaux modes de fonctionnement des installations de ventilation mécanique et pour les différences de pression qui en résultent.

Il est important de comprendre que ces deux méthodes de mesure ne donnent pas les mêmes résultats, mais qu'elles permettent de connaître les caractéristiques d'étanchéité à l'air d'un immeuble.

En même temps que les mesures d'étanchéité à l'air, on mesure les différences de pression maintenues par l'enveloppe pour les raisons suivantes.

a) Obtenir les différences de pression au cours des essais suivants : essai d'étanchéité à l'air, essais des ventilations minimale et maximale, et essai de vérification du CVCA en modede fonctionnement normal.
b) Chiffrer les fuites d'air dans certaines aires en combinaison avec des données d'essai d'étanchéité à l'air et d'inspections par thermographie.
c) Déterminer les différences de pression moyenne dans les modes de fonctionnement des installations de ventilation mécanique de l'immeuble.
d) Déterminer la consommation totale d'énergie attribuable aux fuites lors de la simulation sur ordinateur de la consommation d'énergie.
e) Enregistrer les différences de pression dues aux différentes vitesses et directions du vent de tous les côtés de l'immeuble et déterminer la répartition des différences de pression autour de l'immeuble pour différentes vitesses et directions du vent.

1.2 GÉNÉRALITÉS

Les taux d'infiltration et d'exfiltration d'air d'un immeuble dépendent de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur et de l'étanchéité à l'air de son enveloppe. La pression exercée sur l'enveloppe provient du vent, des différentes masses volumiques de l'air intérieur et de l'air extérieur, et des installations de ventilation mécanique. La différence de pression totale est approximativement la somme algébrique des trois facteurs précédents.

$$Q = \sqrt{Q_{tirage}^2 + Q_{vent}^2 + Q_{ventilation}^2} \qquad (1)$$

où Q = débit (L/s)

Cette équation donne une valeur un peu élevée du taux d'infiltration, notamment dans le cas des bâtiments de grande hauteur.

Les différences de pression à l'origine de l'exfiltration sont responsables de la migration de la vapeur, de l'intérieur du bâtiment vers les régions froides des murs, des châssis de fenêtres et des toits. La diffusion de vapeur par des ouvertures dans le matériau peut entraîner une rapide accumulation d'eau par condensation qui risque de détériorer l'enveloppe. Le phénomèneest encore plus accentué en hiver, dans les zones où se produisent les plus fortes exfiltrations. Les ouvertures par lesquelles la vapeur et l'eau peuvent passer sont généralement les fissures et les joints entre matériaux différents des murs extérieurs. Ces ouvertures sont souvent la cause d'infiltrations de poussières et de pollutions, de l'augmentation des coûts de chauffage et de climatisation, des pertes d'humidité en hiver et des gains d'humidité en été.

Dans les immeubles de plusieurs étages, les séparations entre étages ne sont ni totalement ouvertes ni totalement étanches à l'air. L'air circule donc verticalement en passant par les cages d'escalier, les puits d'ascenceur, les gaines verticales, etc. L'effet

de tirage provient des différences de température entre l'air ambiant intérieur et l'air extérieur. L'air chaud ayant une masse volumique moins élevée que l'air froid monte et prend laplace de l'air froid. En même temps, l'air qui se refroidit voit sa masse volumique augmenter et reste en place. Au cours de l'hiver, l'air, après s'être infiltré, est réchauffé par le chauffage et par les installations de ventilation mécanique et monte aux étages supérieurs de l'immeuble. L'air réchauffé des étages supérieurs, de masse volumique moindre, produit une pression positive (supérieure à la pression atmosphérique). L'air déplacé des étages inférieurs produit une pression négative (inférieure à la pression atmosphérique) dans les étages inférieurs.

La différence des températures intérieure et extérieure est proportionnelle à l'effet de tirage. Lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur augmente, l'effet de tirage augmente aussi. Lorsque l'effet de l'installation de ventilation mécanique et les pressions du vent sont négligeables, le plan de pression nulle (pression égale à la pression atmosphérique) se trouve approximativement à mi–hauteur de sorte que les infiltrations d'air froid dans les étages inférieurs sont égales aux exfiltrations dans les étages supérieurs. Au cours de la période de chauffage, l'air s'infiltre aux étages inférieurs, monte par les gaines verticales et les autres ouvertures dans les planchers et sort par les ouvertures du toit et les murs extérieurs des derniers étages.

Au cours de la période de climatisation, lorsque la température de l'air extérieur est supérieure à la température de l'air intérieur, la circulation de l'air dans l'immeuble est inversée. L'air extérieur chaud s'infiltre dans les étages supérieurs, se refroidit et descend dans les étages inférieurs. Il se produit alors une pression positive dans les étages inférieurs et négative dans les étages supérieurs.

Les infiltrations d'air par les murs extérieurs des étages inférieurs au cours de la période de chauffage créent des courants d'air froid et font pénétrer les polluants dans l'immeuble. Les exfiltrations d'air par le toit et les murs extérieurs des derniers étages peuvent conduire à des détériorations par condensation lorsque la vapeur se refroidit sous la température de condensation à l'intérieur des murs. Ces problèmes augmentent avec la hauteur de l'immeuble, les basses températures extérieures et les fortes humidités relatives intérieures.

Au cours de l'été, lorsque les températures de l'air extérieur sont plus élevées que celles de l'air intérieur, les différences depression et les circulations d'air s'inversent. Dans les étages inférieurs, il se produit des exfiltrations et, dans les étages supérieurs, des infiltrations. L'air descend à l'intérieur de l'immeuble. Cet effet de tirage inversé est moins fort que celui qui se produit en hiver à cause des plus petites différences de température entre l'intérieur et l'extérieur pendant la période de climatisation.

Le deuxième facteur qui produit des différences de pression sur les parois extérieures est le vent. Les différences de pression dépendent de la vitesse et de la direction du vent et de la forme de l'immeuble (san soublier l'effet de la végétation locale et des structures voisines). Les effets du vent sur les parois extérieures de l'immeuble peuvent être réduits par des coupe–vent et des modifications de la forme de l'immeuble.

Généralement, la moitié de l'immeuble exposé au vent subit une pression positive tandis que l'autre subit une pression négative (succion). L'aire totale sur laquelle s'exerce la pression positive n'est pas nécessairement égale à l'aire totale sur laquelle s'exerce la succion. Mais, comme l'immeuble a un volume fini, la pression positive totale due au vent est égale à la pression négative totale due au vent.

La pression provenant des installations de ventilation mécanique qui font circuler l'air dans l'immeuble est le troisième facteur à l'origine des différences de pression. La répartition des infiltrations et des exfiltrations et des pressions intérieures est modifiée par tout déséquilibre entre l'alimentation et l'extraction d'air. Les installations de ventilation mécanique peuvent être programmées pour fournir une pression positive ou négative afin de modifier les infiltrations et les exfiltrations d'air par l'enveloppe. Au moyen des horaires de fonctionnement quotidiens, il est possible de déterminer quand fonctionnent et comment sont réglées les installations de ventilation mécanique. La plupart des immeubles fonctionnent selon quelques modes prévus à l'avance pour chaque saison. Les réglages vont d'un minimum d'air neuf sans circulation d'air à un maximum d'air neuf et une circulation complète. On crée une pression positive dans la plupart des immeubles debureaux et des immeubles commerciaux modernes pourempêcher les courants d'air provenant de l'extérieur afin d'enaméliorer le confort, de réduire le chauffage supplémentaire nécessaire en périphérie et d'empêcher l'infiltration des polluants ou des eaux de pluie. La quantité d'air neuf à introduire pour obtenir une pression positive donnée dépend de l'étanchéité de l'enveloppe.

La pressurisation des immeubles augmente les risques de condensation résultant de l'exfiltration de l'air intérieur chaud et humide. Il faut donc améliorer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des immeubles pressurisés avec prudence.

2. DÉLIMITATION DU SUJET

2.1 CADRE GÉNÉRAL

On utilise la technique de dépressurisation au moyen d'un ventilateur étalonné pour déterminer les caractéristiques d'étanchéité et de fuite d'air d'un immeuble et la méthode de diminution de la concentration de gaz traceurs pour déterminer le taux d'infiltration d'air d'un immeuble pour diverses différences de pression. Dans cette dernière méthode, après avoir introduit une quantité connue de gaz traceurs dans un volume, on enregistre la diminution progressive de la concentration des gaz traceurs. Le taux de renouvellement d'air peut être déterminé à partir de la décroissante logarithmique de la concentration des gaz traceurs en fonction du temps.

Lorsqu'on dispose d'un ventilateur étalonné, les caractéristiques d'étanchéité à l'air peuvent être toutes obtenues par la méthode de la pression induite (ou de la dépressurisation). Le débit d'air du ventilateur pour une différence de pression connue sert à calculer les caractéristiques d'étanchéité à l'air de l'enveloppe.

Les deux méthodes comportent trois étapes.

a) La mesure des différences de pression de part et d'autre des murs extérieurs de l'immeuble.
b) La mesure et/ou le calcul de l'effet de tirage dû aux différences de température et la détermination des effets du vent sur les différences de pression à travers l'enceinte de l'immeuble.
c) Le calcul des infiltrations et des exfiltrations d'air lorsque les effets du vent et du tirage sont connus.

L'enregistrement des pressions pendant les essais d'étanchéité à l'air est nécessaire pour relier la différence de pression au débit d'air afin de construire les courbes de fuite d'air. Lorsqu'ils sont effectués avec ou sans registres étanchés, ces essais permettent de déterminer les fuites par ces registres. Dans les immeubles de grande hauteur, les différences de pression sont mesurées au sommet et à la base, et parfois à chaque étage pour vérifier les variations de pression dues au tirage. Il existe des équations qui permettent de corriger l'influence des différences de température sur les différences de pression.

L'enregistrement des différences de pression moyenne au cours du fonctionnement normal de l'immeuble peut être effectué à toute heure du jour compte tenu de l'horaire de fonctionnement. Des pressions de fonctionnement standard sont utilisées pour déterminer les débits d'air et le volume approximatif des infiltrations d'air dans l'immeuble ainsi que les coûts énergétiques correspondants.

En même temps que l'on enregistre continuellement les différences depression moyenne à au moins quatre niveaux, des mesures particulières sont relevées dans le plus grand nombre d'endroits possible. Les mesures ponctuelles sont reportées dans un tableau qui indique aussi les vitesses et la direction du vent, pour vérifier la relation qui existe entre la direction et les vitesses du vent et les différences de pression à travers l'enveloppe de l'immeuble. Ensuite, la différence de température est corrigée.

Des dispositions d'enregistrement des pressions similaires sont employées pour obtenir les différences de pression à travers l'enveloppe de l'immeuble pour les ventilations minimale et maximale obtenues par les installations de ventilation mécanique de l'immeuble. Ces données sont utilisées pour déterminer les paramètres de fonctionnement des installations de ventilation mécanique de l'immeuble.

L'enregistrement continu des pressions statiques en amont et en aval des ventilateurs d'alimentation et d'extraction d'air de certaines installations de ventilation mécanique est effectué avec les installations réglées dans les positions de renouvellemnt d'air minimal et maximal. Ces essais servent à vérifier les installations mécaniques.

Les essais peuvent avoir lieu à n'importe quelle période de l'année, mais les différences de température doivent être corrigées pour correspondre à une seule valeur de référence afin de pouvoir comparer les résultats des essais.

2.2 LIMITES DES TECHNIQUES DE MESURE

2.2.1 Techniques d'enregistrement des pressions

Pour obtenir de très nombreuses mesures en de nombreux endroits de l'immeuble, l'enregistrement continu des différences de pression maintenues par l'enveloppe de l'immeuble se fait au moyen d'enregistreurs automatiques à bandes (graphiques) ou manuellement. Les enregistreurs tracent des graphiques donnant le profil des pressions au cours de la période. Ils servent essentiellement à enregistrer de façon continue les différences depression à divers niveaux de l'immeuble. L'information obtenue doit être relevée manuellement pour servir à d'autres calculs. Bien que ces graphiques comportent une quantité importante d'informations, les données ne peuvent pas être traitées automatiquement pour effectuer des opérations plus détaillées.

L'erreur humaine est un facteur important lorsque les données sont obtenues manuellement. Les emplacements des prises de pression déterminent le temps nécessaire pour obtenir les mesures. Si les relevés doivent être effectués dans de nombreux endroits de l'immeuble, il faut mobiliser de nombreuses personnes (une parprise de pression) pour obtenir de nombreuses mesures simultanées ou les personnes doivent parcourir de longues distances en effectuant les lectures prise par prise. Les lectures sont effectuées à des moments différents et les comparaisons ne sont que relatives à cause du facteur temps. Les données obtenues par cette technique sont copiées sur les feuilles de relevés pour servir aux calculs.

L'acquisition automatique des différences de pression, mesures individuelles ou moyennes, n'a pas été effectuée jusqu'à maintenant, mais devrait être réalisée dans l'avenir.

2.2.2 Méthode du ventilateur étalonné

Les ventilateurs externes étalonnés ne peuvent être utilisés que pour les immeubles de faible volume, lorsque les infiltrations et les exfiltrations d'air par l'enveloppe pour une différence depression spécifique (environ 50 Pa) sont égales au débit d'air créé par le

ventilateur. La limite de cette technique provient du débit maximum que peut produire le ventilateur étalonné. Au Canada, seul le CNRC dispose à l'heure actuelle d'un ventilateur assez puissant pour mesurer l'étanchéité à l'air des grands immeubles.

Au lieu de se servir du ventilateur étalonné du CNRC, on peut étalonner les ventilateurs d'extraction de l'immeuble. Pour simplifier, il serait préférable de n'utiliser qu'un seul ventilateur, mais on trouve rarement un ventilateur assez puissant pour produire les différences de pression nécessaires.

Les ventilateurs étalonnés servent, soit à la technique de pressurisation, soit à la technique de dépressurisation. L'inconvénient de ces méthodes provient du fait que les taux d'infiltration et d'exfiltration ne sont obtenus que pour des différences de pression importantes dépassant le plus souvent les différences de pression normales. Les résultats peuvent donc être faussés puisque des pressions excessives peuvent modifier les dimensions des ouvertures accidentelles, parfois même de façon irréversible, causant une réduction de l'étanchéité à l'air pour des différences de pression plus faibles.

La méthode présente les avantages de la simplicité, de la possibilités de comparer les résultats de plusieurs immeubles, de la précision sans que des conditions minimales pour le vent ne soient exigées, de la possibilité de comparer les résultats avec d'autres résultats basés sur d'autres différences de température, de la facilité de répérage des infiltrations et des exfiltrations locales en effectuant des inspections par thermographie et de l'utilité des résultats pour spécifier des travaux de réparation.

2.2.3 Techniques des gaz traceurs

Cette technique est très utile pour les grands immeubles dans les cas suivants : les ventilateurs étalonnés ne peuvent pas créer des différences de pression suffisantes pour les essais, les ventilateurs étalonnés ne sont pas disonibles, les installations de ventilation mécanique ne peuvent pas être étalonnées de façon utile, les installations de ventilation mécanique ne peuvent pas créer les différences de pression nécessaires aux essais.

La technique des gaz traceurs exige du temps et beaucoup d'interventions humaines. Comme on obtient le taux d'infiltration d'air pour une seule différence de pression, il faut recommencer l'essai pour obtenir d'autres taux d'infiltration. Les essais pour plusieurs conditions de fonctionnement doivent être effectués individuellement. Selon la taille et la forme de l'immeuble, un essai dure de 4 à 8 heures. De plus, comme chaque immeuble est unique, les techniques d'injection et d'échantillonnage peuvent différer d'un immeuble au suivant. Une planification détaillée des opérations à effectuer est très importante pour obtenir des mesures valables.

L'injection et la diffusion des gaz traceurs dans le volume à l'essai doivent être effectuées soigneusement pour obtenir des données précises sur la diminution progressive de leur concentration. Cette opération est plus difficle qu'elle ne semble à priori. La diffusion des gaz traceurs jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme est nécessaire pour obtenir des résultats comparables d'une aire à l'autre. Si l'injection des gaz est effectuée au moyen de l'installation de ventilation mécanique, les aires moins bien ventilées recevront moins de gaz traceurs. Lorsque l'installation de ventilation mécanique fonctionne selon le mode de circulation d'air maximale aucours de

l'échantillonnage pour assurer une bonne répartition des gaz traceurs, des problèmes de mélange peuvent surgir si l'installation de ventilation mécanique ne fournit pas la même quantité d'air que celle évacuée par l'installation d'extraction ou si l'installation d'extraction d'air fonctionne mieux dans les aires centrales qu'à la périphérie des étages.

Si l'injection des gaz s'effectue manuellement, toute erreur entre les méthodes d'injection et les emplacements prévus pour les injections peut fausser les résultats. L'injection manuelle est généralement préférée mais elle requiert davantage demain–d'oeuvre.

La prise d'échantillons se fait, soit le long des conduits de retour d'air sur une longue période (2 à 8 h), soit manuellement en marchant dans les étages et en remplissant des sacs d'air dans les emplacements prévus. La collecte des échantillons parles conduits de retour suppose que, de chaque aire de l'immeuble, la même quantité d'air retourne à l'installation de ventilation mécanique. Dans les immeubles non équipés de conduits de retour d'air individuels, il n'y a pas un retour uniforme de l'air provenant de tous les emplacements du plancher. L'échantillonnage simultané dans des aires prévues requiert l'intervention de plusieurs personnes et nécessite beaucoup de temps pour tout un immeuble. Dans les deux techniques, il faut obtenir un grand nombre de sacs contenant les échantillons d'air et l'analyse des échantillons est très longue.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 ÉTAPE I – ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE

3.1.1 Description des techniques

3.1.1.1 Analyse des documents d'archive

Avant la première visite de l'immeuble, l'équipe étudie les dessins d'archive et/ou les derniers documents contractuels afin de repérer les éléments principaux de l'immeuble. L'attention doit porter sur les zones qui nécessitent des essais. Des notes sont prises pour repérer certaines zones qui devront être inspectées au moment des visites et préparer sommairement les essais à effectuer sur place.

Les stratégies à employer pour les mesures doivent provenir de cette analyse. Elles comprennent les méthodes de pressurisation et de dépressurisation au moyen d'un ventilateur étalonné ainsi que les méthodes utilisant de gaz traceurs. Les facteurs qui influent sur le type d'essai de fuite d'air à effectuer et sur la stratégie d'enregistrement des différences de pression maintenues par l'enveloppe sont la taille, la forme et l'aménagement intérieur de l'immeuble ainsi que l'emplacement, le nombre et la taille des installations de ventilation mécanique.

Les renseignements obtenus lors de cette étude comprennent : la taille du ventilateur nécessaire pour les méthodes faisant appel à la pressurisation, les types de ventilateurs étalonnés disponibles pour les essais, le meilleur type de gaz traceur pour l'immeuble à tester, les types de gaz traceurs disponibles et l'équipement d'analyse, le nombre, les emplacements et les stratégies d'échantillonnage pour les essais d'étanchéité au moyen de gaz traceurs.

3.1.1.2 Première visite des experts

Au cours d'une première visite de l'immeuble, les experts évaluent l'état général de l'immeuble, repérent les zones présentant des risques de défaillance. Ces observations ont lieu au cours de la première visite lorsque l'équipe examine avec soin l'état de l'enveloppe pour décider des stratégies de mesure de l'étanchéité à l'air. Pour obtenir le plus d'information possible, des photographies et des notes sont prises afin de servir à la planification des travaux ultérieurs et afin de sélectionner les emplacements où des essais seront effectués lors des prochaines visites. Les informations obtenues servent à préparer les entrevues et les questionnaires.

a) Annotation des plans – Notes sur un plan d'étage (ou sur un plan d'implantation) pour renvoyer éventuellement à des données abstraites. Les visites initiales visent à deviner les problèmes qui surgiront. Elles nécessitent l'intervention d'un observateur expérimenté à l'esprit inventif. Les observations doivent être faites à différentes heures de la journée, lorsque l'immeuble est occupé ou inoccupé. Plus le plan sur lequel sont notées les observations est précis, plus les données seront utiles pour l'analyse effectuée loin du site (référence : Rendement fonctionnel, document de classe D21, Annotation des plans).

b) Listes de vérification – Élaborées à partir des observations pour indiquer les conditions et leur fréquence. Elles doivent contenir des défaillances telles que l'efflorescence, la décoloration, l'écaillement, le décollement, la corrosion, les emplacements des prises et des sorties d'air, les types des vêtements supplémentaires portés par les occupants, la présence de ventilateurs, appareils de chauffage ou humidificateurs personnels, les taches sur les appuis de fenêtre, les murs, les carreaux et les autres indices de défaillances.

c) Photographies – Elles sont utiles lorsqu'elles illustrent la façon dont les gens ont modifié leur environnement pour parvenir à un but. Elles montrent comment le milieu indique indirectement des dégradations cachées ou servent à observer des dégradations visibles.

d) Essais de repérage des courants d'air – Ils sont effectués dans les aires suspectes avec des crayons à fumée. Les crayons à fumée servent à détecter les petits courants d'air et leurs directions dans une pièce, à proximité des fenêtres ou à proximité des emplacements d'infiltration ou d'exfiltrations d'air possibles.

3.1.2 Équipement

3.1.2.1 Analyse des documents d'archive

Les documents du contrat à étudier sont les suivants:

dessins d'exécution;
cahiers des charges;
addenda;
commandes de modification;
rénovations après la construction initiale.

L'analyse des documents est basée sur la science du bâtiment et les principes des essais d'étanchéité à l'air. Voir la section 4.0 pour obtenir les références relatives à ces principes.

3.1.2.2 Visite des experts

Nos propres sens constituent l'équipement le plus précieux. La vue, le toucher, l'odorat et le goût servent tous à détecter des défauts d'étanchéité à l'air. L'équipement de la liste suivante est aussi très utile:

a) appareils photographiques 35 mm avec plusieurs objectifs (35 mm, 50 mm, macro 50 mm, zoom 40–160 mm) et un flash;
b) carnet de notes, réductions des plans pour prendre des notes;
c) crayons à fumée;
d) échelles, petite et grande rallonges;
e) couteau avec lames–outils, ruban à mesurer, tournevis et vis, pinces, marteaux, produit d'obturation, ruban à masquer, pour des essais destructifs mineurs;
f) salopettes pour se protéger de la saleté; et
g) jeu complet de documents contractuels comme référence.

3.1.3 Marche à suivre

3.1.3.1 Analyse des documents d'archive

Les dessins de détail des éléments suivants doivent être étudiés avec soin pour relever tous les points faibles de la conception et de la construction:

a) détails des murs;
b) joints fenêtres/murs;
c) détails du toit;
d) raccordement mur/toit;
e) raccordement mur/plancher; et
f) joints de dilatation.

Identifier le type et les emplacements des produits d'étanchéité.

Les renseignements suivants sur les installations de ventilation mécanique doivent être connus pour pouvoir préparer une méthode d'essai:

a) emplacements des gaines verticales (équipements mécanique et électrique);
b) équilibre entre l'alimentation en air et l'extraction d'air;
c) différences de pressions négatives et positives prévues;
d) emplacements des registres d'alimentation en air neuf;
e) emplacements des sorties d'air, installations d'extraction d'air des laboratoires, locaux d'équipement électrique, toilettes, etc.

Noter les modifications apportées depuis la construction jusqu'à l'état actuel.

3.1.3.2 Visite des experts

Lors de la première visite, le gérant de l'immeuble doit faire visiter l'immeuble et indiquer les opérations de fonctionnement habituelles. La visite doit inclure les locaux techniques (équipements mécanique et électrique), les installations hors–toit et les haufferies. L'état du toit, des volets et des grilles, des conduits d'alimentation, de retour et d'extraction doit être noté. C'est l'occasion de discuter des problèmes de fonctionnement avec le responsable du fonctionnement du bâtiment.

Une visite générale doit être effectuée en prenant des notes et en interrogeant les chefs de service, en inspectant les éléments architecturaux, notamment les fenêtres, les escaliers extérieurs et le raccordement mur/toit au–dessus des plafonds suspendus. Toutes les aires endommagées doivent être photographiées et repérées sur les plans. Chaque photo doit comporter des commentaires avec un numéro de référence correspondant à la photo appropriée.

Des essais de détection de courants d'air doivent être effectués dans les aires suspectes au moyen de crayons à fumée. Il faut prendre des notes sur les chemins empruntés par l'air ou sur les anomalies de parcours de l'air fourni et de l'air extrait et les noter sur les plans.

Pour les essais de vérification de l'étanchéité à l'air, les tâches suivantes sont effectuées au cours de la visite des experts.

a) Repérer les emplacements où des enregistrements continus des infiltrations ou des exfiltrations et des différences depression de part et d'autre de l'enveloppe sont nécessaires. Ce travail peut résulter d'un examen visuel, d'essais avec un crayon à fumée, de questions posées au responsable du fonctionnement de l'immeuble, au gestionnaire de l'immeuble et à divers occupants. Les horaires des occupants de l'immeuble doivent être fournis pour planifier les essais.

b) Les documents d'archive doivent être étudiés après la première visite pour vérifier les emplacements particuliers où il faut en registrer les différences de pression. La visite de l'immeuble doit servir à vérifier les informations tirées des dessins contractuels.

c) Bien que la planification des enregistrements des infiltrations, des exfiltrations et des différences de pression soit faite avant la première visite de l'immeuble, la finalisation de cette planification se fait après, lorsqu'on prépare d'autres méthodes d'essai.

d) Avant la première visite, il faut savoir si des ventilateurs étalonnés sont disponibles. Lors de la visite, il faut inspecter les ouvertures qui doivent recevoir ces ventilateurs pour vérifier leur utilité.

e) Au cours de la visite, il faut vérifier les ressources en personnel local pour effectuer les essais. Les travaux en question exigent du personnel qualifié et non qualifié capable de fabriquer des obturateurs pour les volets mécaniques pendant les essais de pressurisation, d'installer des matériaux pour atteindre le endroits normalement inaccessibles du toit, d'injecter des gaz traceurs et de recueillir des échantillons.

3.1.4 Analyse et évaluation

3.1.4.1 Analyse des documents d'archive

Le volume de l'immeuble et ses taux d'infiltration et d'exfiltration d'air prévus doivent servir à déterminer la taille du ventilateur nécessaire pour l'essai de pressurisation ou de dépressurisation. Si l'immeuble est trop grand pour le plus grand ventilateur étalonné disponible, il faut utiliser la technique des gaz traceurs. Il faut connaître le volume de l'immeuble pour déterminer la quantité de gaz traceurs nécessaire aux essais.

Les dimensions des ouvertures extérieures et la hauteur de l'immeuble servent à déterminer l'effet de tirage potentiel dans les conditions des essais et à implanter les prises de pression pour l'enregistrement continu des différences de pression. La hauteur de l'immeuble sert aussi à déterminer l'effet du vent sur l'enveloppe.

La conception de l'immeuble permet de choisir une stratégie pour l'injection des gaz traceurs et pour le prélèvement d'échantillons. La conception de l'installation de ventilation mécanique permet de déterminer si elle peut être utilisée pour produire les pressions nécessaires aux essais faisant appel à la technique des gaz traceurs et si un étalonnage est possible afin d'enregistrer les débits dans l'installation pour diverses différences de pression. Si cela est possible, il n'est pas nécessaire de disposer de ventilateurs étalonnés pour les essais exigeant une pressurisation ou une dépressurisation.

3.1.4.2 Visite des experts

Les données sont rassemblées en inscrivant toutes les informations sur la série de plans d'étage, le plan d'implantation et les élévations. Les remarques sont basées sur les principes de la science du bâtiment relatifs aux effets dynamiques de l'humidité, de la température, des déplacements d'air, des attaques chimiques et biologiques.

Une évaluation finale des données obtenues est effectuée en même temps que l'on obtient les résultats sur:

- l'infiltration et l'exfiltration d'air;
- l'installation de ventilation mécanique;
- les inspections par thermographie;
- les études de résistance et de capacité;
- les essais de vérification de la qualité de l'air;
- les essais de vibration;
- les installations électriques;
- les éclairages; et
- les essais de confort thermique.

3.1.5 Affectation des ressources et calendrier

3.1.5.1 Analyse des documents d'archive

L'analyse des documents contractuels pour la préparation des essais d'étanchéité à l'air et l'enregistrement des différences de pression requièrent 1 à 2 personnes/semaines selon la complexité de l'immeuble. Ce travail est effectué par un scientifique du bâtiment (architecte ou ingénieur) connaissant parfaitement les principes des sciences du bâtiment.

3.1.5.2 Visite des experts

La visite des experts ne dure généralement pas plus d'une journée (heures normales de travail). Pour permettre une meilleure communication entre tous les membres de l'équipe multidisciplinaire et afin de fournir des renseignements identiques et de partager une appréciation commune de l'immeuble, la visite a lieu de sorte que tous les membres participant à la préparation des essais soient présents. Le directeur des essais, le responsable de l'immeuble, le responsable du fonctionnement de l'immeuble et le représentant du propriétaire devraient être présents pour répondre aux questions du groupe chargé des essais de l'immeuble. Ce groupe comprend des professionnels et des techniciens travaillant dans les domaines indiqués en 3.1.4.2.

Après la visite de l'immeuble, tous les membres de l'équipe doivent se réunir pour envisager les stratégies à mettre en oeuvre et étudier les informations importantes récoltées au cours de la visite. Au moins une après–midi complète est nécessaire à cette activité. Selon la complexité des travaux, une durée supplémentaire allant jusqu'à deux jours peut être nécessaire pour accomplir le travail.

3.1.6 Documentation : création et archivage des documents de travail

Toutes les informations relatives aux volumes des espaces intérieurs, aux aires des murs extérieurs et du toit, aux taux d'infiltration et d'exfiltration d'air et aux tailles et capacités des installations de ventilation mécanique de l'immeuble sont notées et

archivées pour servir aux calculs de l'étape III de la méthode. Des formulaires de données sur l'immeuble sont créés. Les stratégies possibles sont identifiées, notées et étudiées par les membres de toutes les disciplines mentionnées pour choisir la méthode d'essai qui sera la plus efficace.

L'information obtenue lors de la visite de l'immeuble est conservée sur des films de 35 mm (diapositives et tirages sur papier, en noir et blanc et en couleurs), sur les carnets de note des membres de l'équipe et sur les plans annotés des membres de chaque discipline. Le plan annoté résumant les notes de toute l'équipe est élaboré au cours d'une réunion qui a lieu après la visite de l'immeuble. Les renseignements apparaissant sur les photos sont utilisés dans les rapports.

3.2 ÉTAPE II – TECHNIQUES DE MESURE SIMPLES

Les techniques de mesure de l'étape II comprennent l'enregistrement continu des différences de pression de part et d'autre de l'enveloppe de l'immeuble et l'utilisation de crayons et de bombes à fumée pour repérer les passages d'air à travers l'enveloppe. Bien qu'ils soient classés comme techniques de mesure simples, les enregistrements continus des différences de pression constituent aussi une partie de l'étape III pour les raisons suivantes : obtention des différences de pression pendant le fonctionnement normal des installations de ventilation mécanique au cours des différentes saisons, enregistrement continu des différences de pression pendant les essais d'étanchéité à l'air, enregistrement continu des pressions du vent en certains endroits de l'enveloppe de l'immeuble.

3.2.1 Description des techniques

3.2.1.1 Enregistrement continu de la pression

Pour enregistrer les différences de pression moyenne de part et d'autre de l'enveloppe au cours des essais d'étanchéité à l'air et la pression pendant le fonctionnement normal de l'installation de ventilation mécanique, des tubes de plastique sont mis en place sur les quatre façades au même niveau que le manomètre ou le transducteur servant aux mesures. Les tubes se rejoignent aucollecteur qui est raccordé au dispositif de mesure. On peut relever les mesures individuellement en raccordant successivement chacun des tubes au dispositif de mesure.

Les données sont enregistrées de façon intermittente manuellement ou de façon continue au moyen d'un enregistreur à bande (graphique).

La même méthode est utilisée pour enregistrer la pression pendant les essais des ventilations minimale et maximale.

Pour enregistrer de façon continue les effets de la pression du vent à divers niveaux, des prises de pression sont placées à des emplacements particuliers de l'enveloppe et les relevés sont effectués simultanément et enregistrés manuellement.

Dans les structures de grande hauteur, les différences de pression pour divers niveaux sont obtenues en faisant passer les tubes dans les espaces communicants verticaux. Les tubes comportent des raccordements en T à chaque étage où un tube parcourt l'aire deplancher. Les relevés des pressions sont obtenus en raccordant le dispositif de mesure en partie supérieure ou en partie inférieure et en obturant toutes les extrémités sauf une.

Dans les structures de grande hauteur, la différence de pression moyenne au sommet de la structure est mesurée par les mêmes méthodes que celles mentionnées précédemment pour le premier étage. Des relevés pour chaque étage sont obtenus sur chaque façade des étages supérieurs au moyen de la même méthode d'enregistrement de la pression que celle du premier étage.

3.2.1.2 Crayons et bombes à fumée

Les crayons et les bombes à fumée servent à détecter les passages d'air à travers l'enveloppe de l'immeuble. La fumée est dégagée en diverses quantités par ces moyens et l'on peut suivre visuellement et noter ses déplacements. Les crayons à fumée servent à observer les passages d'air très petits, tandis que les bombes à fumée sont employées pour les grands volumes.

3.2.2 **Équipement**

3.2.2.1 Enregistrement continu de la pression

- Manomètres Magnahelix; domaines des pressions de 0.00 à 0.10 po d'eau, de 0.00 à 0.50 po d'eau et de 0.00 à 0.25 po d'eau
- Manomètres Hays (voir le mode d'emploi du fabricant)
- Transducteurs de pression du CNRC, choix de plusieurs domaines de pression
- Tubes de plastique de 8 et 10mm de diamètre extérieur et raccords et pinces pour tubes de plastique
- Collecteur en cuivre pour tube sous pression du CNRC
- Ruban à masquer, ruban pour tuyauterie (largeur 2 po)
- Échelle à marches de 4 m, échelle à marches de 3 m
- Tube de cuivre de 6mm de diamètre extérieur, coupe–tuyau
- Tubes capillaires de 6mm de diamètre extérieur
- Enregistreur à bande (graphique) du CNRC (mesurant le débit en fonction de la différence de pression). Graphiques en bande pour l'enregistreur précédent
- Feuilles blanches pour noter les différences de pression, le temps et les emplacements.

3.2.2.2 Crayons et bombes à fumée

- Ensemble de crayons à fumée de détection CH 216
- Générateur de fumée Fog–Master FM–1 (générateur de fumée pour théâtre).

3.2.3 **Méthode de mesure détaillée**

3.2.3.1 Mesure de la différence de pression moyenne à un niveau

L'emplacement, le nombre et la configuration des tubes de pression à l'intérieur de l'immeuble dépendent des essais effectués et de la taille, de la forme et de la hauteur de l'immeuble. Ces paramètres doivent être déterminés avant d'aller relever les mesures sur place.

Avant d'aller relever les mesures sur place, il faut élaborer un plan des opérations à effectuer pendant les essais d'étanchéité à l'air, l'inspection par thermographie et l'évaluation de l'enregistrement des pressions. Ce plan doit être vérifié parle chef

d'équipe responsable de l'étude énergétique, l'ingénieur en mécanique, le responsable du fonctionnement de l'immeuble qui fera fonctionner les ventilateurs d'extraction de l'immeuble et/ou l'entrepreneur qui fait fonctionner le ventilateur étalonné.

Mettre en place la tuyauterie de sorte que des sections aplaties de tube en cuivre de 6mm passant sous les portes extérieures soient raccordées aux tubes de plastique de chaque côté des portes pour assurer le passage de l'air. Les tubes placés à l'extérieur doivent être fixés aux murs extérieurs. Les tubes placés à l'intérieur vont du raccord en cuivre à un collecteur commun placé au centre de l'immeuble au même niveau que l'extrémité des tubes extérieurs. Les tubes intérieurs de tous les cotés de l'immeuble sont fixés aux ouvertures du collecteur par une extrémité tandis qu'un tube est raccordé à l'enregistreur en bande (graphique). Cette disposition sert à obtenir la différence de pression moyenne à des niveaux particuliers. Les tubes sont posés à même le sol et sont maintenus en place par du ruban adhésif dans les aires à forte circulation.

La conception du collecteur revêt une grande importance. Le diamètre de la chambre de mélange doit être supérieur à ceux des tubes qui s'y raccordent. Afin d'amortir les fluctuations rapides de pression, des tubes capillaires en verre sont interposés entre le manomètre ou le transducteur et le collecteur. On obtient ainsi une résistance minimale après le mélange des pressions d'air provenant de toutes les prises d'air. On fait l'hypothèse que la résistance produite parles raccords de cuivre aplatis passant sous les portes extérieures est approximativement égale à celle produite par le tube capillaire.

Les tubes transmettant les pressions sont vérifiés. On vérifie notamment que les raccords sont bien jointifs et qu'il n'y a pas de fuites le long des tubes. On vérifie périodiquement les tubes en les raccordant individuellement à un transducteur ou à un manomètre pour obtenir des résultats fiables.

Les différences de pression peuvent être relevées à diverses heures de la journée dans tout l'immeuble. Les données sont notées sur les feuilles de relevés. Les réglages de l'installation de ventilation mécanique sont relevés sur l'horaire de fonctionnement et corrélés aux lectures des différences de pression. On obtient ainsi les pressions individuelles et la pression moyenne à des emplacements relativement éloignés. Pour réduire le plus possible les erreurs, il faut utiliser des instruments similaires pour effectuer les mesures.

3.2.3.2 Mesure des différences de pression à plusieurs niveaux

Pour obtenir les différences de pression à plusieurs niveaux d'un immeuble, la différence de pression de l'étage supérieur doit d'abord être mesurée. Voir les détails des méthodes à utiliser dans la section précédente. Dans ce cas, les tubes doivent passer par les portes donnant accès au toit. Les tubes doivent rejoindre les quatre côtés de l'immeuble et enjamber le parapet de sorte que leur extrémité ouverte se trouve approximativement au même niveau que le manomètre situé à l'intérieur. On peut attacher des poids de 2 à 3 livres aux extrémités des tubes extérieurs pour s'assurer qu'ils restent bien contre l'immeuble.

Les tubes doivent parcourir l'immeuble du sommet à la base afin de déterminer la différence de pression entre le niveau où la différence de pression intérieure/extérieure moyenne est mesurée et tous les autres étages. À chaque étage un raccord en T est

introduit dans les tubes verticaux et un tube horizontal parcourt le corridor de cet étage. Les pinces servent à arrêter la circulation de l'air dans les tubes horizontaux et l'extrémité ouverte du niveau inférieur. L'extrémité supérieure des tubes est raccordée au manomètre. L'autre ouverture du manomètre reçoit le tube du collecteur de pression. En retirant une pince à la fois, on obtient la différence de pression des deux niveaux avec les extrémités ouvertes. Le tube capillaire en verre est inséré dans les tubes de pression de part et d'autre du manomètre afin de servir d'amortisseur aux résistances variables des autres parties des tubes et pour réduire les erreurs. Ce travail est effectué en se servant de radiotéléphones portatifs afin de coordonner l'ouverture et la fermeture des tubes sur plusieurs niveaux.

Dans la plupart des immeubles de grande hauteur, il est facile de faire passer les tubes verticaux dans les escaliers d'incendie et les tubes horizontaux dans les corridors de chaque étage. Lorsqu'on retire les pinces des tubes horizontaux, il faut les placer immédiatement sur les tubes verticaux sous le raccord en T pour mesurer les différences de pression à chaque niveau. Les tubes et les raccords sont constamment vérifiés pour s'assurer qu'il n'y a pas de fuite. L'enregistrement des données est plus facile à effectuer dans la soirée lorsque l'immeuble n'est pas occupé.

Cette technique de mesure des différences de pression sert aussi à mesurer les différences de pression de tout l'immeuble lors des mesures du taux d'infiltration par la méthode des gaz traceurs. Lorsqu'elle est utilisée pour mesurer l'étanchéité à l'air, cette technique est très pratique pour obtenir les profils des pressions moyennes.

3.2.3.3 Enregistrement continu des pressions : essais d'étanchéité à l'air au moyen d'un ventilateur étalonné

La mise en place des tubes est celle prescrite en 3.2.3.1 et, lorsqu'il s'agit d'un immeuble de grande hauteur, en 3.2.3.2.

Pour calculer les taux d'infiltration et d'exfiltration d'air au moyen d'un ventilateur étalonné, il faut trouver la relation entre le débit du ventilateur et la différence de pression. Les mesures des pressions font donc partie de cette méthode et sont nécessaires pour chaque série de lectures du débit ainsi que pour les étapes de vérification entre les lectures.

Le texte qui suit indique précisément quand et pourquoi les lectures des pressions doivent être effectuées.

a) Lorsqu'on vérifie le débit maximal du ventilateur, il faut connaître les pressions pour s'assurer que les données obtenues lors des essais seront exactes. Si le ventilateur ne produit pas la dépressurisation nécessaire, les ventilateurs d'extraction d'air de l'immeuble doivent être mis en marche pour tenter d'augmenter la dépressurisation.

b) Tous les ventilateurs de retour d'air étant en marche et le ventilateur étalonné étant arrêté et obturé, les ventilateurs de retour d'air sont arrêtés un à un tandis que l'on mesure les différences de pression et les débits d'air. On note les numéros des ventilateurs que l'on arrête sur la bande de l'enregistreur.

c) Tous les ventilateurs de retour d'air et le ventilateur étalonné étant arrêtés et obturés, on note la différence de pression de référence. Elle représente les pressions combinées du vent et de l'effet de tirage à un niveau donné.

d) Le ventilateur étalonné étant arrêté et obturé, on effectue le réglage pour obtenir la même différence de pression que celle enregistrée avec tous les ventilateurs de retour en marche, et on enregistre le débit. Ce débit d'air représente le volume d'air extrait de l'immeuble par les ventilateurs d'extraction.

e) Le ventilateur étalonné avec ou sans les ventilateurs d'extraction de l'immeuble est réglé pour obtenir son débit maximum et les différences de pression maximales. Le débit est alors réduit pour obtenir des différences de pression diminuant de 10 en 10 Pa. Les pressions et les débits correspondants sont enregistrés. Cette opération est effectuée pour au moins 5 différences de pression.

f) Si d'autres tubes sont placés dans d'autres parties de l'immeuble, les relevés des différences de pression particulières sont effectués à ces endroits. Ces relevés sont comparés aux relevés des moyennes pour déterminer les effets duvent sur l'immeuble au cours des essais d'étanchéité à l'air.

g) La série d'essais précédente est effectuée avec les registres d'alimentation et d'évacuation d'air fermés et étanchés par des obturateurs en contre–plaqué dans le cas des essais de pressurisation ou au moyen de feuilles de polyéthylène de 6 mils et de ruban adhésif dans le cas des essais de dépressurisation. Ensuite, tous les registres sont ouverts. Lorsque les ventilateurs d'extraction ne fonctionnent pas, leurs registres sont aussi fermés et les volets sont étanchés comme mentionné précédemment. Les relevés des pressions se font dans ces conditions.

h) Si on utilise la technique des gaz traceurs, la différence de pression moyenne de part et d'autre de l'enveloppe est continuellement enregistrée. Durant ces essais, les installations de ventilation mécanique fonctionnent selon le mode de recirculation maximale pour améliorer la diffusion des gaz traceurs. Le ventilateur étalonné et/ou les ventilateurs d'extraction d'air de l'immeuble étant à l'arrêt, on mesure la différence de pression de référence afin de connaître les effets combinés du vent et de la pression statique.

La différence de pression moyenne pour les quatres façades principales est mesurée au moyen d'un transducteur de pression du type à diaphragme et est enregistrée sur un enregistreur à bande. Au cours des essais d'étanchéité à l'air, les mesures de différence de pression moyenne sont continuellement relevées sur l'enregistreur à bande. Les essais d'infiltration d'air donnent le temps de relever les mesures individuellement en des emplacements prévus à l'avance. Les lectures sont effectuées sur une base régulière, à des intervalles de 10 à 15 min au cours des essais. Le temps nécessaire aux mesures dépend du nombre et de la distance entre les tubes de pression et du nombre de personnes relevant les mesures. Les transducteurs de pression du type à diaphragme, les compteurs et les manomètres digitaux HEISSE permettent d'effectuer ces mesures.

3.2.3.4 Enregistrement continu des pressions : réglages d'apports maximal et minimal d'air neuf (installation de ventilation mécanique)

Cette méthode permet de trouver les différences de pression moyenne de part et d'autre de l'enceinte de l'immeuble lorsque l'installation de ventilation mécanique est réglée successivement sur l'apport minimal et l'apport maximal d'air neuf. Dans certains

immeubles où ces réglages sont effectués automatiquement au moyen d'un ordinateur central, le responsable du fonctionnement de l'immeuble doit enclencher ces réglages manuellement. Les réglages sont modifiés selon les saisons.

Les mesures des pressions moyennes sont effectuées au cours de chaque réglage pour déterminer l'effet de l'installation de ventilation mécanique sur les profils des pressions de l'immeuble.

Les étapes détaillées de la méthode décrite en 3.2.3.1 servent à effectuer les mesures des pressions. Les mesures sont effectuées, soit à des moments où les réglages des installations de ventilation mécanique sont connus, soit après l'intervention du responsable du fonctionnement de l'immeuble qui passe d'un réglage à l'autre toutes les 5 à 10 minutes les mesures étant effectuées dans l'intervalle. Cette technique est avantageuse car les installations peuvent être totalement arrêtées pour mesurer la faible pression due à l'effet de tirage et à la pression du vent.

On demande en général au responsable du fonctionnement de faire fonctionner l'installation selon quatres réglages différents, notamment:

1. registres d'alimentation en air neuf complètement ouverts;
2. registres d'alimentation en air à moitié ouverts;
3. registres d'alimentation en air complètement fermés (recirculation totale); et
4. arrêt complet de l'installation.

Au cours de chaque réglage, on relève les différences de pression et l'heure dans tous les emplacements prévus.

3.2.3.5 Essais au moyen de crayons et de bombes à fumée

Les crayons à fumée sont utilisés pour repérer les grands déplacements d'air autour et au travers de l'enveloppe de l'immeuble. L'utilisation des crayons à fumée ne se limite pas aux essais d'étanchéité à l'air ou aux autres conditions de fortes différences de pression. Ils peuvent être utilisés à tout moment pour détecter les déplacements d'air importants à travers l'enveloppe en un emplacement choisi. Cet équipement est très utile pour confirmer les fuites d'air qui se produisent généralement à la jonction de matériaux différents sur les murs extérieurs. Lorsqu'on utilise ce matériel à proximité de grandes surfaces unies, le déplacement d'air sera généralement vertical. Ce résultat indique l'absence de fuite d'air ou une très faible fuite d'air par le mur.

Les bombes à fumée servent à détecter les emplacements des fuites à l'intérieur de l'enveloppe. Elles sont généralement plus efficaces lorsque les différences de pression sont plus fortes. Les conditions optimum sont obtenues en réglant les installations de ventilation mécanique de l'immeuble, les ventilateurs étalonnés pour les essais (essais d'étanchéité à l'air) ou lorsque le vent est très fort. Les bombes à fumée sont placées à l'intérieur de l'immeuble. Les observations visuelles sont effectuées des espaces adjacents et de l'extérieur. Les autres emplacements appropriés à l'usage des bombes à fumée sont les aires communiquant par des gaines ou des conduits. Il est important d'observer la diffusion de la fumée dans toutes les parties de l'immeuble afin de bien percevoir les caractéristiques des courants d'air dans l'aire à l'essai. Dans certains cas, les fuites ne se produisent pas vers l'extérieur, mais vers d'autres aires de l'immeuble par les murs extérieurs, les gaines verticales ou les conduits voisins.

À cause des gros nuages de fumée générés par cette technique, les essais doivent avoir lieu en–dehors des heures d'occupation de l'immeuble. Ces essais peuvent très bien avoir lieu au cours des essais d'étanchéité à l'air, surtout si l'inspection par thermographie a déjà révélé des fuites d'air par l'enveloppe.

3.2.4 Analyse et évaluation

3.2.4.1 Mesure de la différence de pression moyenne à un niveau

La différence de pression moyenne est enregistrée, soit manuellement sur des feuilles blanches ou automatiquement sur une bande (graphique). Les valeurs lues directement sur le graphique ou sur les feuilles de relevés sont utilisées pour l'analyse de l'étanchéité àl'air, pour les essais avec apports d'air neuf maximum et minimum et pour les essais avec des réglages particuliers de l'installation de ventilation mécanique.

Ces mesures sont utilisées en même temps que les taux d'infiltration et d'exfiltration obtenus lors des essais d'étanchéité à l'air pour déterminer les caractéristiques d'étanchéité à l'air et lors des essais aux gaz traceurs pour déterminer les taux d'infiltration des enceintes.

L'enregistrement continu des différences de pression moyenne est effectué pour quantifier les forces responsables des infiltrations et des exfiltrations d'air et pour préciser les déplacements d'air repérés lors de l'inspection par thermographie.

Les mesures de pression moyenne sont comparées aux mesures des pressions individuelles. Les écarts par rapport à la moyenne permettent de percevoir la vitesse du vent et l'effet de tirage. On étudie ensuite la relation entre les mesures des différences de pression sur les côtés de l'immeuble et la vitesse du vent.

Les mesures de la pression moyenne servent de référence pour le calcul des profils de pression de l'immeuble due à l'effet de tirage.

3.2.4.2 Mesures des différences de pression de divers niveaux

La différence de pression due à l'effet de tirage à une distance h du plan des différences nulles de pression (pression relative à la pression atmosphérique) est calculée par la formule suivante :

$$P_t = .0342\ h\ P_a \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i}\right) \qquad (2)$$

où
- P_t = pression due à l'effet de tirage (Pa)
- h = hauteur de l'immeuble (m)
- P_a = pression atmosphérique (Pa)
- T_e = température extérieure (K)
- T_i = température intérieure (K)

Les paramètres qui ont le plus d'effet dans cette équation sont la hauteur de l'immeuble et la différence entre Te et Ti. On admet évidemment que la pression atmosphérique varie peu.

Presque tous les immeubles de grande hauteur ont un si grand nombre d'ouvertures pour la circulation verticale de l'air que l'on peut considérer que l'air circule librement.

3.2.4.3 Enregistrement continu de la pression : essais d'étanchéité à l'air

Les caractéristiques d'étanchéité à l'air d'un immeuble sontdéfinies par l'équation suivante:

$$q = C\ (\Delta p)^n \qquad (3)$$

où
- q = fuite d'air totale par unité de surface de mur extérieur ($L/s.m^2$);
- C = coefficient de débit ($L/s.m^2.(Pa)n$)
- Δp = différence de pression de part et d'autre du mur extérieur (Pa)
- n = exposant de débit (variable de 0.5 à 1.0).

L'enregistrement continu de la pression est nécessaire pendant tous les essais d'étanchéité à l'air. Les mesures des différences de pression moyenne de part et d'autre de l'enceinte de l'immeuble sont indispensables pour calculer les taux d'infiltration et d'exfiltration d'air.

3.2.4.4 Enregistrement continu de la pression sous les réglages min. et max. de l'installation de ventilation mécanique

Les valeurs des différences de pression moyenne obtenues en 3.2.3.1 sont reliées aux différents réglages de l'installation deventilation mécanique. Les pressions résultantes pour chaque réglage sont comparées aux réglages de pression prévus.

Cela permet aux responsables du fonctionnement de l'immeuble et aux ingénieurs de modifier l'installation de ventilation mécanique pour obtenir les conditions prévues correspondant à chaque saison. Elles sont utilisées pour mieux comprendre les forces dynamiques qui influent sur les infiltrations et les exfiltrations d'air.

Les données relatives aux pressions sont aussi utilisées pour déterminer les pressions en service au cours des essais de ventilations minimale et maximale. Pour l'évaluation des données utilisées pour l'essai de ventilation avec apport d'air neuf minimal, voir le guide d'administration de l'immobilier, vol. n° 6, Formules et directives, TPC.

3.2.4.5 Essais avec les crayons et les bombes à fumée

Cette méthode d'essai donne des résultats qualitatifs seulement. Les crayons à fumée, lorsqu'ils sont utilisés autour de l'enveloppe d'un immeuble, indiquent la direction et la vitesse relative des déplacements d'air. Le cheminement de l'air à travers l'enceinte peut aussi être observé, mais il faut procéder à une inspection et à une étude plus poussées. Généralement, les voies empruntées par l'air pour fuir sont mieux repérées au moyen des bombes à fumée.

Les bombes à fumée servent à repérer l'emplacement des fuites d'air en surface et les chemins empruntés par l'air pour traverser l'enceinte d'un immeuble. Une fois les emplacements des fuites repérés, une inspection par thermographie permet d'obtenir des résultats plus précis. Une fois que les zones réputées problématiques au point de vue des fuites d'air sont identifiées, les essais d'étanchéité à l'air peuvent être préparés et effectués pour obtenir des résultats quantitatifs. Ces résultats servent aux ingénieurs en mécanique pour déterminer la charge de chauffage et la charge de climatisation. Ils servent aussi à confirmer les plaintes d'inconfort thermique en périphérie et à préparer les réglages de l'installation de ventilation mécanique pour les zones périphériques.

3.2.5 Affectation des ressources et calendrier

3.2.5.1 Mesure de la différence de pression moyenne à un niveau

La mise en place des tubes de pression dans un immeuble nécessite de 2 à 20 heures personnes et parfois plus. Cette opération peut être effectuée par une personne mais, en général, plusieurs personnes y participent. Les paramètres permettant de déterminer le temps nécessaire pour mettre en place les tubes de pression comprennent, entre autres :

- la taille, la forme et la configuration de l'immeuble;
- la facilité d'accès à l'intérieur et à l'extérieur de l'immeuble;
- la possibilité d'accéder à l'extérieur à des niveaux particuliers; et
- la facilité avec laquelle les tubes peuvent être placés dans des endroits particuliers.

Les tubes sont mis en place au début de la visite et laissés enplace pendant toute la visite. Les mesures de pression sont effectuées au cours des essais et le temps alloué renvoie à des mesures particulières.

Le retrait des tubes et des autres appareils d'enregistrement nécessite de 1 à 10 personnes heures.

La vérification, l'étalonnage et les réparations de l'équipement sont minimes étant donné la simplicité de celui–ci. Le temps consacré à cette tâche est de l'ordre de 2 à 5 personnes heures par visite. La préparation requiert en moyenne de 3 à 9 personnes heures par visite.

Les professionnels responsables des essais d'étanchéité à l'air peuvent également être responsables de la préparation, du réglage et du fonctionnement de l'équipement d'enregistrement. L'aide de techniciens sur place est nécessaire pour les réglages et l'enregistrement des mesures.

Comme les mesures sont enregistrées manuellement, l'analyse est relativement courte. Une personne heure suffit au traitement des valeurs relevées.

3.2.5.2 Mesures particulières de la pression

Bien que des mesures particulières puissent être effectuées pendant toute la visite, elles ne sont effectuées que pour des essais particuliers. Si les mesures sont relevées manuellement, un minimum d'une personne pour deux ou trois emplacements est nécessaire pendant la durée des essais. La consignation automatique n'existe pas encore. Plus le nombre d'emplacements où il faut prendre des mesures est grand, plus il faut de personnes.

Il est indispensable de recourir à un professionnel aidé de techniciens pour planifier et relever les mesures simultanément au moyen de l'équipement d'enregistrement des pressions. Au cours de cette activité, chaque personne doit disposer d'au moins un manomètre ou un transducteur de pression.

Les essais, l'étalonnage et les réparations de l'équipement nécessitent en moyenne de 2 à 5 personnes heures par visite. La préparation nécessite de 3 à 9 personnes heures par visite.

L'analyse des mesures nécessite de 2 à 4 personnes jours selon la complexité.

3.2.5.3 Mesure de la différence de pression de divers niveaux

La mise en place et le retrait des tubes de pression pour ces essais requiert de 12 à 30 personnes heures. Le travail est en général effectué en même temps que la mise en place des tubes pour les mesures de pression moyenne à un niveau. Les relevés des mesures se font en même temps que les autres essais (essais d'étanchéité à l'air, essais d'infiltration d'air). Plus l'immeuble comporte d'étages, plus le temps alloué aux relevés des mesures surtous les étages est grand. Pour un immeuble moyen de 10 étages, un minimum de 1 heure est nécessaire pour relever les pressions de tous les étages. La préparation est effectuée comme prévu en 3.2.5.1 par le professionnel responsable des essais. Les techniciens effectuent les relevés.

L'analyse des relevés est très courte : moins de 1 personne jour.

3.2.5.4 Enregistrement de la pression : essais d'étanchéité à l'air au moyen d'un ventilateur étalonné

L'enregistrement est effectué au cours des essais d'étanchéité à l'air. Le technicien qui fait fonctionner le ventilateur étalonné enregistre aussi la pression et les débits au cours de l'essai. Cet essai dure une soirée entière. Voir 3.2.3.1 pour la mise en place des tubes de pression.

L'analyse et le traitement des graphiques nécessitent de 3 à 5 personnes jours. Les valeurs servent à calculer les taux d'infiltration et d'exfiltration d'air.

3.2.5.5 Enregistrement de la pression : réglages min. et max. de l'installation de ventilation mécanique

Ce travail fait partie des essais avec apports minimal et maximal d'air neuf. En plus de l'équipement et du temps nécessaires pour accomplir le travail décrit en 3.2.5.1, un ingénieur en mécanique et le responsable du fonctionnement de l'immeuble doivent préparer et effectuer les essais.

L'analyse et le traitement des feuilles de relevés requièrent peu de temps (1 à 2 personnes jours). Les relevés servent surtout à l'essai des installations de ventilation mécanique et pour mettre au point des modèles de simulation de la consommation d'énergie.

3.2.5.6 Essais avec des crayons et des bombes à fumée

Les ressources nécessaires pour accomplir cette tâche dépendent des travaux à effectuer sur place durant les visites. Généralement, il faut 1 à 4 techniciens pour ces essais. L'utilisation des crayons à fumée au cours des premières visites fait partie de l'étude générale et ne demande pas de ressources supplémentaires. Les essais avec les bombes à fumée font partie des essais d'étanchéité à l'air et des essais d'infiltration et d'exfiltration d'air. Ils nécessitent l'intervention de 2 à 5 techniciens pendant 2 à 16 heures.

L'analyse et le traitement des documents nécessitent de 2 à 5 personnes jours. Le temps alloué comprend le développement et le tirage des photos. On considère que ce travail fait partie des essais d'étanchéité à l'air et d'infiltration d'air.

3.2.6 Documentation : création et archivage des documents de travail

3.2.6.1 Mesure de la différence de pression moyenne à un niveau

Les mesures individuelles sont enregistrées sur des feuilles de relevés tandis que les mesures relevées continuellement s'inscrivent sur les graphiques en bande. Ces mesures peuvent être insérées en annexes dans les rapports.

3.2.6.2 Mesure de pression particulière

Les mesures sont inscrites sur des feuilles de relevés au cours des essais sur place. Les valeurs sont reportées en annexes dans les rapports.

3.2.6.3 Mesure de la différence de pression à divers niveaux

Les mesures sont inscrites sur des feuilles de relevés au cours des essais. Les valeurs sont généralement reportées dans les rapports.

3.2.6.4 Enregistrement de la pression : essais d'étanchéité à l'air au moyen d'un ventilateur étalonné

Les pressions sont continuellement enregistrées sur les graphiques en bande en même temps que les débits d'air du ventilateur étalonné. Les informations concernant la méthode des essais (ventilateurs en marche ou à l'arrêt, registres ouverts ou fermés, étanchés ou non, les réglages de l'installation de ventilation mécanique) sont inscrites sur les graphiques en bande pour références. Les graphiques en bande annotés sont ensuite photocopiés et placés en annexes dans les rapports sur l'étanchéité à l'air. Les courbes d'étanchéité à l'air sont tracées à partir de ces valeurs.

3.2.6.5 Enregistrement de la pression : réglages min. et max. de l'installation de ventilation mécanique

Les mesures sont inscrites sur des feuilles de relevés au cours des essais. Les valeurs sont ensuite reproduites pour être placées en annexes dans le rapport d'enregistrement de la pression. Les mesures servent aussi à vérifier celles obtenues lors des essais des réglages min. et max. de l'installation de ventilation mécanique.

3.2.6.6 Essais avec des crayons et des bombes à fumée

Les photographies, les diagrammes des fuites d'air et le repérage des emplacements des fuites obtenus lors des essais sur place au moyen de bombes à fumée sont rassemblés pour être insérés dans le rapport d'étanchéité à l'air. Des informations du même genre obtenues au moyen de crayons à fumée sont rassemblées et insérées dans le rapport d'observations visuelles, mais peuvent aussi être insérées dans le rapport d'étanchéité à l'air. Si les photos sont nombreuses, elles peuvent être placées en annexe.

3.3 ÉTAPE III – TECHNIQUES DE MESURE SPÉCIALISÉES

Cette section traite de la méthode de détermination des caractéristiques d'étanchéité à l'air par pressurisation ou dépressurisation au moyen de ventilateurs externes étalonnés etde la méthode de détermination des taux d'infiltration d'air par diminution de la

concentration d'un gaz ou de plusieurs gaz traceurs pour diverses différences de pression. Avec les deux méthodes, l'immeuble peut être pressurisé ou dépressurisé et les installations de ventilation mécanique de l'immeuble peuvent servir à augmenter la différence de pression de part et d'autre de l'enceinte de l'immeuble.

3.3.1 Description des techniques

3.3.1.1 Méthode de la préssurisation au moyen d'un ventilateur

Voir les sections 3.1 et 3.2 pour les analyses correspondant aux méthodologies de cet essai et les techniques d'enregistrement des pressions correspondantes.

Un immeuble est pressurisé au moyen de ventilateurs étalonnés tandisque les débits d'air sont mesurés pour déterminer les caractéristiques d'étanchéité à l'air de son enveloppe. Si les débits d'air des ventilateurs de l'installation de ventilation mécanique ne peuvent pas être étalonnés séparément et ensemble, il faut utiliser des ventilateurs étalonnés externes pour obtenir les différences de pression requises et les débits d'air correspondants lors de cet essai. Si les ventilateurs externesne fournissent pas les pressions nécessaires, on utilise les installations de ventilation mécanique de l'immeuble pour augmenter les pressions après étalonnage des débits.

Afin de pouvoir négliger les petites différences de pression dues aux effets du vent, de grandes différences de pression sont nécessaires pour effectuer les mesures (50 Pa ou davantage). Dans les immeubles peu étanches à l'air, il faut donc de très gros ventilateurs.

Cette technique permet de mesurer directement les caractéristiques d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Comme l'essai dépend de tous les facteurs modifiant les différences de pression de part et d'autre de l'enveloppe, il ne doit pas être effectué par temps venteux. Les caractéristiques d'étanchéité à l'air de divers éléments peuvent aussi être déterminées ainsi (murs, portes, fenêtres ouvrables, registres mécaniques).

L'immeuble est, soit pressurisé, soit dépressurisé, lorsqu'on mesure le débit d'air. Les immeubles peuvent être directement comparés en comparant les fuites d'air engendrées par des différences depression normalisées.

En résumé, la technique est la suivante :

a) après avoir étanché les registres, les portes et les fenêtres ouvrables, il faut mesurer au moins les 5 débits d'air du ventilateur étalonné pour des différences de pression de 10, 20, 30, 40 et 50 Pa. Ces valeurs servent à tracer la courbe de fuite d'air de l'enveloppe de l'immeuble;

b) il faut mesurer les débits pour la même série de différences depression qu'en a) pour connaître l'étanchéité à l'air de l'enceinte sans étanchement des portes et des fenêtres ouvrables;

c) enfin, il faut mesurer les débits pour les différences de pression maximales pour connaître l'étanchéité à l'air de l'enceinte sans étanchement des portes, des fenêtres ouvrables et des registres mécaniques.

3.3.1.2 Méthode de mesure par diminution de la concentration de gaz traceurs

Cet essai permet de déterminer le taux d'infiltration pour une différence de pression donnée. Une quantité connue de gaz traceurs est relâchée dans un volume connu (immeuble). On laisse le gaz se mélanger à l'air de tout le volume; puis on prélève des échantillons d'air à des intervalles réguliers dans un certain nombre d'emplacements précis. Les échantillons sont ensuite analysés au moyen d'un chromatographe gazeux portatif, de préférence immédiatement après avoir été prélevés. Le taux d'infiltration est déterminé en fonction du taux de diminution de la concentration des gaz traceurs. La diminution de la concentration des gaz traceurs est proportionnelle à la quantité d'air neuf entrant dans le volume.

Pour obtenir les taux d'infiltration pour d'autres différences de pression, l'essai doit être répété. Cet essai prend du temps et demande beaucoup de travail. Selon la taille et la complexité de l'immeuble, ce travail dure généralement de 3 à 4 heures et l'analyse des résultats de 4 à 6 heures.

Cette méthode est très utile lorsque les immeubles sont trop grands ou trop complexes pour être vérifiés par la méthode de pressurisation au moyen d'un ventilateur. Dans les immeubles où le choix de la méthode est possible, des essais de mesure des infiltrations d'air par la méthode de diminution de la concentration de gaz traceurs pour plusieurs différences depression peuvent être effectués pour comparer les résultats à ceux obtenus par la méthode de pressurisation ou de dépressurisation au moyen d'un ventilateur.

Des ventilateurs externes étalonnés peuvent servir à produire la différence de pression uniforme pendant les essais au moyen de gaz traceurs, les différences de pression étant enregistrées au moyen d'un transducteur de pression et d'enregistreurs à bande (graphique).

Les inspections de l'intérieur et de l'extérieur par thermographie peuvent être effectuées pendant que l'immeuble est dépressurisé (oupressurisé) pour les essais d'infiltration d'air.

3.3.2 Équipement

3.3.2.1 Méthode de la pression induite au moyen de ventilateurs étalonnés

- Ventilateur du CNRC : à pales axiales à pas variable, réglable manuellement pour obtenir des débits allant de 0 à 19.5 m^3/s (0 à 42500 pi^3/min)
- 8 sections de conduit de 0.9 m (34 po) de diamètre et de 2.5 m (8 pi) de longueur
- Génératrice à essence pour le ventilateur, 600 V, 60 A
- Transformateur Variac à tension variable pour réguler la tension entre le générateur et le ventilateur
- Remorque à fond plat (10 m) pour transporter le ventilateur, la génératrice et les tubes (si l'immeuble est situé en–dehors d'Ottawa)
- Panneaux de contre–plaqué de 1200 x 2400 x 18 mm (4 pi x 8 pi x 3/4 po), (qualité construction) pour les supports des tubes et l'étanchement des portes
- Clous de 38 mm (1–1/2 po)

- Fil de fer, pour fixer le contre-plaqué à l'ossature des châssis des volets d'aération
- Panneaux de contre-plaqué de 1200 x 2400 x 13 mm (4 pi x 8 pi x 1/2 po) pour étancher les volets d'aération
- Pièces de pin de 50 x 100 mm (2 x 4 po) pour le cadre des obturateurs
- Ruban de néoprène à alvéoles de 12 x 25 mm, adhésif d'un côté
- Ruban à conduit pour étancher les joints entre les obturateurs en contre-plaqué et les cadres de porte

Voir en 3.2.1 et 3.2.2 l'équipement nécessaire aux mesures des différences de pression lors des essais d'étanchéité à l'air.

3.3.2.2 Méthode de la diminution de la concentration d'un gaz traceur

Voir section 3.3.2 au document D37 – Mesure de la vitesse d'échange d'air extérieur.

3.3.3 **Méthode de mesure détaillée**

La taille d'un immeuble et l'incertitude quant à ses caractéristiques d'étanchéité à l'air rendent difficile la prévision de la taille des ventilateurs étalonnés nécessaires pour obtenir les différences de pression appropriées. Le ventilateur étalonné est vérifié avant les essais d'étanchéité à l'air, pour déterminer les différences de pression maximales obtenues audébit maximum.

Les essais indiquent le débit maximum du ventilateur et les différences de pression maximales. Si, au cours des essais préliminaires, le ventilateur ne semble pas pouvoir fournir une pression suffisante, il est possible de recourir aux ventilateurs d'extraction d'air de l'immeuble afin d'obtenir les différences de pression requises pour l'essai de dépressurisation et l'essai au moyen de gaz traceurs. Pour que l'essai au moyen de gaz traceurs soit fiable, l'essai de pressurisation au moyen d'un ventilateur devrait générer une différence de pression d'au moins 50 Pa de part et d'autre de l'enceinte. On peut ainsi obtenir au moins 5 débits avec des différences de 10 Pa. Même lorsque le vent est modéré, les différences de pression de part et d'autre de l'enceinte peuvent fluctuer de 3 à 5 Pa. On introduit alors une erreur de l'ordre de 50 % dans les mesures relevées à 10 Pa.

3.3.3.1 Méthode de pressurisation au moyen d'un ventilateur

Cette méthode exige l'utilisation d'un ventilateur étalonné. Si les ventilateurs de l'installation de ventilation mécanique existante ne peuvent pas être étalonnés et être utilisés pour déterminer les débits pour des différences de pression particulières, des ventilateurs externes étalonnés sont nécessaires. Le seul ventilateur de grande puissance disponible au Canada est celui de la Division de recherche en bâtiment du Conseil national de recherches du Canada. Ce ventilateur est du type à pales axiales à pas variable et peut être réglé manuellement pour obtenir des débits allant de 0 à 19.5 m^3/s (0 à 42500 pi^3/min).

Le courant nécessaire à l'alimentation de ce ventilateur est du 600 V, 60 A pris directement sur les câbles d'alimentation de l'immeuble ou provenant directement d'une génératrice de courant.

L'entrée d'air du ventilateur est relié par un conduit de 0.9 m de diamètre à un panneau de contre-plaqué de 18 mm d'épaisseur placé dans le cadre d'une porte d'entrée.

Un manomètre portatif avec transducteur de pression du type à diaphragme (marge d'erreur statique de 5 % à pleine échelle) et un voltmètre numérique servent à enregistrer la pression et les débits d'air. Les mesures des pressions se font par des tubes placés dans l'immeuble dont les extrémités se trouvent sur les surfaces extérieures de l'enveloppe. Les débits d'air sont mesurés en amont de la prise d'air du ventilateur en se servant des tubes de pression moyenne pour les forts débits et d'une plaque à orifice pour les faibles débits. Ces deux mesures sont relevées sur un enregistreur à bande (graphique).

La méthode comprend les opérations suivantes :

1. Installer le ventilateur dans une entrée de l'immeuble communiquant avec un corridor central ou une aire ouverte sur une grande partie de l'immeuble. On obtient ainsi une distribution plus égale des pressions dans l'immeuble et un temps de réponse plus court aux changements de pression.
2. Étancher les volets d'entrée et de sortie d'air lorsque tous les ventilateurs sont à l'arrêt. Utiliser des obturateurs en contre-plaqué pour les essais de pressurisation et des feuilles de polyéthylène de 4 ou 6 mils pour les essais de dépressurisation. Mettre en marche tous les ventilateurs d'extraction et mesurer la différence de pression moyenne.
3. Arrêter les ventilateurs un à un et noter les baisses correspondantes de pression sur le graphique en bande.
4. Après que tous les ventilateurs d'extraction aient été arrêtés et que les volets d'extraction aient été étanchés, mettre en marche et régler le ventilateur étalonné pour obtenir un débit produisant la même différence de pression que tous les ventilateurs d'extraction. Enregistrer les débits et les différences de pression moyenne au moyen d'un enregistreur à bande. Cette méthode permet de calculer le débit des ventilateurs d'extraction lorsqu'ils sont tous en marche.
5. Régler le ventilateur étalonné pour produire des différences depression équivalentes à celles notées lorsque chaque ventilateur d'extraction est arrêté successivement. Cette opération permet de vérifier et d'étalonner les débits des ventilateurs d'extraction.
6. Après avoir étanché les volets d'entrée, de retour et de sortie d'air, effectuer les essais d'étanchéité à l'air par pressurisation ou par dépressurisation de la façon suivante :
   - au débit maximum et à des différences de pression de 50, 40, 30, 20 et 10 Pa, toutes les installations de ventilation mécanique étant à l'arrêt. La pression de référence est enregistrée lorsque le ventilateur étalonné est à l'arrêt;
   - au débit maximum et à des différences de pression de 50, 40, 30, 20 et 10 Pa, toutes les installations de ventilation mécanique étant en position de reciculation complète. La mesure de la pression de référence est enregistrée lorsque le ventilateur étalonné est à l'arrêt. Retirer les obturateurs des volets un à un lorsque les installations de ventilation

mécanique sont, soit à l'arrêt, soit réglés sur recirculation complète et que le ventilateur étalonné fonctionne à son débit maximum. Enregistrer les baisses de pression correspondantes. Fermertous les registres d'alimentation et d'extraction au moyen d'une intervention sur l'ordinateur central avant de retirer les obturateurs. On obtient ainsi un étalonnage des fuites d'air par chaque registre mécanique.

7. On détermine l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et des volets mécaniques fermés lorsque tous les obturateurs sont enlevés des volets et que le ventilateur étalonné fonctionne à plein débit. Noter le réglage des installations de ventilation mécanique de l'immeuble pour déterminer la pression de référence. Si le réglage est celui de la recirculation complète, éteindre les installations de ventilation mécanique et annoter les effets correspondants sur le graphique en bande de l'enregistreur.
8. Fermer individuellement les volets mécaniques à la main et enregistrer les différences de pression correspondantes. Les mêmes conditions que dans l'essai précédent s'appliquent. On obtient ainsi les fuites d'air par les registres d'alimentation et d'extraction. Si les installations de ventilation mécanique sont à l'arrêt pendant cet essai, les manoeuvrer pour obtenir une recirculation complète et enregistrer les résultats correspondants.

Pour convertir les fuites d'air des essais de pressurisation au moyen d'un ventilateur en taux d'infiltration, il faut procéder aux étapes suivantes :

1. Effecteur l'essai de pressurisation comme indiqué ci–dessus.
2. Calculer les valeurs C et n de l'équation (3) en fonction des résultats de l'essai.
3. Calculer C2i pour un étage typique à partir de l'équation :

$$C_i = \left(\frac{A_i}{A}\right) \times C$$

où A_i = aire du mur extérieur d'un étage
A = aire du mur extérieur de l'immeuble
C_i = flow coefficient of one typical floor

4. Faire fonctionner l'installation de ventilation mécanique à un réglage particulier.
5. Mesurer la différence de pression moyenne de part et d'autre de l'enveloppe pour un étage (ΔP_i).
6. Calculer le taux de fuite d'air pour cet étage à partir de l'équation suivante :

$$I_i = C_i \times \Delta P_i^{n}$$

où I_i = fuites d'air pour un étage
C_i = coefficient pour l'étage
ΔP_i = differentiel de Pression moyenne

7. Répéter les étapes 5 et 6 pour chaque étage.
8. Calculer le taux d'infiltration d'air total à partir de l'équation suivante :

$$I = \Sigma I_i$$

Remarquer que I est le taux d'infiltration d'air total de l'immeuble pour le réglage particulier des installations de ventilation mécanique et les conditions climatiques régnantes lorsque les pressions ont été mesurées. L'étape 8 doit être répétée pour plusieurs conditions climatiques différentes. La méthode des gaz traceurs donne aussi le taux d'infiltration total, comme à l'étape 8. Ces deux résultats peuvent seulement être comparés lorsque les conditions sont identiques.

Voir 3.2.3.1, 3.2.3.2 et 3.2.3.3 pour les méthodes détaillées d'enregistrement des pressions au cours des étapes de cet essai.

3.3.3.2 Méthode de la diminution de la concentration de gaz traceurs

1. Vérifier les ventilateurs utilisés pour obtenir la pression à l'intérieur de l'immeuble. Nettoyer et étiqueter les sacs des échantillons d'air avant de les distribuer. Distribuer au personnel les plans des étages montrant les emplacements des injections des gaz et des prélèvements d'échantillons. Monter et régler le chromatographe gazeux étalonné qui doit servir à l'analyse des échantillons.
2. Arrêter les installations de ventilation mécanique. Fermer les registres d'extraction avant de relâcher les gaz. Obturer et étancher les volets mécaniques. Utiliser des feuilles de polyéthylène pour les essais de dépressurisation et ne pas étancher les volets d'extraction. Pour les essais de pressurisation, un matériau plus rigide est utilisé (généralement du contre-plaqué).
3. Indiquer sur les plans les zones de prélèvement des échantillons Repérer ces zones par rapport au zonage de l'installation de ventilation mécanique.
4. Injecter les gaz dans les zones désignées. La concentration de gaz dans tout l'immeuble doit être d'environ 15 à 20 ppm. Pour déterminer la concentration des gaz, le volume de l'immeuble est multiplié par la concentration de gaz traceur nécessaire.

$$\frac{BV \times (a) \times (1000\ L/m^3)}{1{,}000{,}000} = TGV \qquad (4)$$

où BV = volume de l'immeuble (m^3)
a = concentration de gaz traceur (parties par million)
TGV = volume de gaz traceur (L)

Pour convertir le volume de gaz traceur en poids, il faut utiliser l'équation suivante :

$$Dtg = \frac{P \times GMW}{R \times T} \qquad (5)$$

où Dtg = masse volumique de gaz traceur (g/L)
P = pression (atmosphère)
GMW = poids moléculaire (g/mole)
T = température (K)
R = constante de gaz universelle (0.082056 x L x atmosphère) mole x Kelvin

On obtient ainsi la quantité de gaz traceur en poids nécessaire pour obtenir la concentration appropriée au début de l'essai. Cette concentration est vérifiée lors de l'analyse des premiers sacs échantillons prélevés immédiatemment au début de la pressurisation ou de la dépressurisation.

5. Lorsqu'on a achevé l'injection des gaz, il faut attendre 15 min pour permettre leur diffusion dans les zones prévues avant de régler les installations de ventilation mécanique dans le mode de recirculation. Il faut ensuite pressuriser l'immeuble à la pression désirée et laisser l'installation sur ce réglage pendant toute la durée de l'essai au moyen des gaz traceurs. Les premiers échantillons doivent être prélevés au début de la pressurisation. Il faut prélever un minimum de 5 et si possible de 6 sacs échantillons à des intervalles de 30 min.
6. Analyser les samples. Étudier les résultats de l'analyse après chaque série d'échantillonspour s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus. Effectuer l'analyse de la diminution du taux de concentration des gaz pourlesdifférentes zones et pour le volume entier de l'immeuble après la visite sur place.

Pour les méthodes de montage et de réglage du chromatographe gazeuxet pour effectuer les analyses des sacs échantillons, se reporter au section 3.3.3 dans le document D37.

3.3.3.3 Utilisation du ventilateur étalonné pendant l'essai au gaz traceur

Généralement l'essai au gaz traceur est effectué lorsque l'on ne peut pas utiliser des ventilateurs étalonnés. Les ventilateurs étalonnés peuvent servir à créer une pression dans l'immeuble. L'avantage de leur utilisation dans cet essai consiste non seulement à produire des différences de pression plus fortes mais aussi une gamme de pressions pour simuler les conditions de fonctionnement normal de l'immeuble.

Dans ces cas, les étapes à suivre sont les suivantes.

1. Après l'injection du gaz, faire fonctionner le ventilateur étalonné externe pendant deux heures ou plus à une pression constante. Remplir les sacs échantillons dans les zones d'injection du gaz toutes les 30 min.
2. Lorsque cette opération est terminée, injecter de nouveau du gaz dans l'immeuble. Remplisser une autre série de sacs échantillons de la même façon, aux mêmes emplacements, pour les mêmes différences depression.

Au cours de la saison de chauffage, les essais de pressurisation réduisent le risque de gel dans la piomberie et sont préférables aux essais de dépressurisation. Au cours des essais avec des gaz traceurs pour de fortes différences de pression (40 Pa et plus), la fréquence de prélèvement des échantillons d'air peut être réduite en raison de la plus forte diminution de concentration.

3.3.3.4 Enregistrement de la pression au cours des essais aux gaz traceurs

À cause de la longueur des essais de fuites d'air aux gaz traceurs, l'obtention de conditions idéales pour enregistrer les différences de pression est nécessaire. Si des prises de pression individuelles sont en place à l'extérieur, les mesures de pression relevées manuellement peuvent être notées toutes les 15 minutes et enregistrées sur les feuilles de relevés. Ces mesures de pression sont confrontées aux données sur le vent relevées sur place et servent à déterminer les effets du vent sur l'enceinte.

La différence de pression moyenne des façades principales est enregistrée par l'intermédiaire d'un transducteur de pression sur un enregistreur à bande (graphique) ainsi que le débit généré par le ventilateur étalonné. La pression moyenne est comparée aux pressions mesurées afin de déterminer les écarts entre la norme et les extrêmes.

3.3.3.5 Inspections par thermographie au cours des essais aux gaz traceurs

Les essais d'étanchéité à l'air aux gaz traceurs offrent aussi des conditions idéales pour effectuer des inspections par thermographie de l'enceinte de l'immeuble dans des conditions de fortes différences de pression. Tandis que l'immeuble est dépressurisé, l'inspection des murs extérieurs de l'intérieur par thermographie permet de détecter les zones de fuites d'air.

Lorsque l'immeuble est pressurisé au cours des essais d'étanchéité à l'air, les inspections extérieures permettent de détecter les fuites anormales de l'enceinte. Pour obtenir davantage dedétails, voir la science des matériaux : Document de classe D, D38 – Inspections par thermographie et notamment les sections traitant des inspections par thermographie effectuées au cours des essais d'étanchéité à l'air.

3.3.4 **Analyse et évaluation**

3.3.4.1 Méthode de la pression induite

Les caractéristiques d'étanchéité à l'air d'un immeuble sont définies en utilisant l'équation suivante :

$$q = C\ (\Delta P)^n \qquad (3)$$

où
- q = taux de fuite d'air global par/unité d'aire de mur extérieur, $L/s.m^2$
- C = coefficient de débit, $L/s.m^2.(Pa)n$
- ΔP = différence de pression de part et d'autre du mur extérieur, Pa
- n = exposant de débit (compris entre 0.5 et 1.0)

L'exposant de débit est une fonction de la différence de pression, ce qui explique que sa valeur varie d'un immeuble à l'autre. Il peut varier de 0.5, pour un écoulement par un orifice à 1.0, pour un écoulement laminaire. 0.65 est une valeur moyenne qui représente bien la plupart des fuites dans les murs et parles joints des fenêtres. La valeur du coefficient de débit C peut être normalisée à la puissance 0.65 pour pouvoir comparer des immeubles de type similaire.

Au cours des essais, le CNRC a déterminé un coefficient de débit C variant de 0.30 (étroit) à 0.70 $L/s.m^2$ (Pa)0.65 (large) pour des écoles, la moyenne se situant à 0.50 $L/s.m^2$ (pa)0.65. Le coefficient de débit pour les tours de bureaux varie généralementde 0.09 à 0.36 $L/s.m^2$ (Pa)0.65, la moyenne étant de 0.22$L/s.m^2$ (Pa)0.65. Les valeurs obtenues pour les immeubles à l'essai devraient être comparées à ces valeurs.

Pour déterminer les fuites d'air à travers l'enveloppe comme point de référence pour les valeurs mesurées, les effets du vent et du tirage sont calculés par les formules ci-dessous. La vitesse et la direction du vent sont relevées par une station météorologique placé sur le toit de l'immeuble.

Fuites d'air dues au vent

Lorsque la direction du vent est perpendiculaire à la façade de l'immeuble, les pressions sont positives du côté au vent et négatives sur les trois autres côtés. D'autres types de répartition des pressions se produisent lorsque la direction du vent est oblique par rapport à la façade ou lorsque l'immeuble est de forme irrégulière. Les pressions internes changent de sorte que les infiltrations soient égales aux exfiltrations. Ces fuites d'air dépendent de la pression de vent exercée. La pression dynamique du vent de référence est calculée par la formule suivante :

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \qquad (7)$$

où
- q = pression dynamique du vent de référence (Pa)
- ρ = masse volumique (kg/m³)
- V = vitesse du vent de référence (m/s)
- V = $0.37\ V_S\ (Z)^{0.25}$ – pour les terrains comportant de nombreux bâtiments de faible hauteur
- V = $0.178\ V_S\ (Z)^{0.38}$ – pour les terrains comportant de nombreux bâtiments de grande hauteur
- V_S = vitesse du vent à la station météorologique à 10 m de hauteur
- Z = Hauteur (m)

Fuites d'air dues à l'effet de tirage

La différence de pression à une distance (h) du niveau des différences nulles de pression (relativement à la pression atmosphérique) est donnée par la formule suivante :

$$Ps = 0.0342\ h\ Pt\ \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i}\right) \qquad (8)$$

où
- Ps = pression due à l'effet de tirage (Pa)
- Pt = pression barométrique (Pa)
- T_e = température extérieure (K)
- T_i = température intérieure (K)

Infiltration due à l'effet de tirage

Dans les immeubles de grande hauteur, les infiltrations d'air se produisent généralement dans les étages inférieurs lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est plus grande (hiver). Les infiltrations d'air peuvent être calculées par la formule suivante :

$$Q = 0.96\ C\ S\ (\gamma \Delta T/Te)^{0.85}\ H^{1.85}\ .\ (m^3/S) \qquad (9)$$

où
- Q = infiltrations par l'enveloppe de l'immeuble (m³/s)
- C = coefficient de fuite d'air pour les murs extérieurs
- S = périmètre de l'immeuble
- γ = coefficient thermique (0.8)
- ΔT = différence de température entre l'intérieur et l'extérieur
- T_e = température extérieure
- H = hauteur de l'immeuble

Fuite d'air dues à plusieurs effets combinés

Les différences de pression responsables des fuites d'air sont dues au vent, au tirage et aux pressions créées par les installations de ventilation mécanique. Lorsque plusieurs de ces facteurs ou tous ces facteurs interviennent en même temps, les différences de pression totales sont formées par les sommes algébriques de chaque effet. Les études effectuées au CNRC ont conduit à l'équation suivante représentant les effets combinés du vent et du tirage sur les infiltrations d'air :

$$\frac{Qws}{Qlrg} = 1 + 0.24 \left[\frac{Qsml}{Qlrg}\right]^{3.3} \qquad (10)$$

où Qws = taux d'infiltration d'air dû aux effets combinés
Qlrg = le plus grand de Qw ou Qs
Qsml = le plus petit de Qw ou Qs

Les étapes de l'essai fournissent les taux des fuites d'air pour les niveaux de pression correspondants. Ces données sont introduites dans un programme d'ajustement de courbe basé sur l'équation (3) et les valeurs C et n sont déterminées au moyen d'une analyse régressive des moindres carrés. Ces données sontreportées sur un graphe avec les valeurs de C et de n calculées.

Calcul de débit

Le calcul du débit est basé sur les courbes de fuites d'air tracées à partir des débits d'air et des différences de pression relevées au moyen du ventilateur étalonné. La courbe est établie au moyen d'une méthode d'ajustement correspondant à l'équation suivante :

$$y = I\,(x^n) \qquad (11)$$

où y = débit
x = différence de pression de part et d'autre du mur extérieur, Pa
n = exposant de débit (calculé par un programme d'ajustement de courbe)
I = intégrale calculée par le programme d'ajustement

Comme I et n sont déduits de la courbe de fuite d'air, cette équation peut être utilisée pour calculer une série de débits correspondant à une différence de pression donnée quelconque (Pa).

Renouvellements d'air

L'équation du renouvellement d'air d'un immeuble est la suivante :

$$RAH = \frac{Q\ (m^3/s) \times 60 \times 60}{\text{volume de l'immeuble } (m^3)} \qquad (12)$$

où Q = débit déterminé à partir de la courbe de fuite précédente
RAH = nombre de renouvellements du volume d'air total de l'immeuble par heure

Taux de fuite d'air

Les taux de fuite d'air ne sont généralement calculés que pour les aires des murs extérieurs. Les toits sont supposés relativement étanches à l'air. Les aires qui font l'objet d'un calcul peuvent comprendre les murs d'une installation hors–toit lorsque de grandes ouvertures pour le passage des conduits font communiquer les étages occupés et les locaux techniques de l'installation hors–toit. Seuls les espaces pressurisés devraient être pris en considération dans le calcul de l'aire des murs. Pour chaque pression, le taux de fuite peut être donné par l'équation suivante :

$$Qa = \frac{Qb}{A} \qquad (13)$$

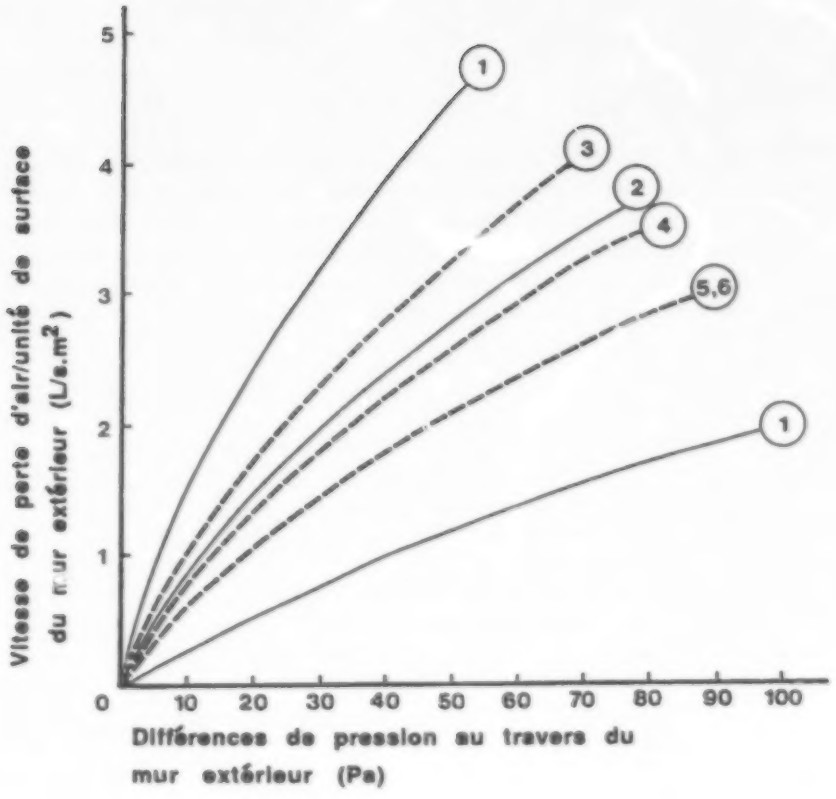
où Qa = taux de fuite d'air par unité d'aire d'enveloppe ($L/s/m^2$)
Qb = fuite d'air totale de l'immeuble (L/s)
A = aire totale des murs pressurisés (m^2)

Le taux de fuite d'air lorsque les volets mécaniques sont fermés et que les installations de ventilation mécanique fonctionnent est calculé. Les taux calculés sont ensuite comparés aux courbes de fuite d'air du CNRC (voir le FIGURE 3.3.1).

Les données sur les fuites d'air sont généralement normalisées pour correspondre à une différence de température de zéro entre l'intérieur et l'extérieur. Dans les essais où ΔT est inférieurà 15°C, le facteur de correction est petit et n'a qu'un effet minime sur la courbe de fuite d'air.

Pour obtenir des résultats précis, on suppose qu'une température uniforme a été maintenue dans l'immeuble. De plus, l'écart de pression maximum dû à l'effet du vent et à l'effet de tirage n'a pas été supérieur à 10 % de la différence de pression moyenne mesurée. De plus grands écarts de ces paramètres produisent deserreurs plus importantes pour les faibles différences de pression. Dans ces cas, l'élimination des résultats obtenus pour les faibles différences de pression conduit à une évaluation plus juste des fuites d'air.

Les courbes de fuite d'air déterminées par cet essai servent à définir les caractéristiques d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Cette information quand utiliser dans une programme d'analyse d'energie peut déterminer les charges de chauffage et de refroidissement supplémentaires nécessaires dans les zones périphériques pour compenser les infiltrations d'airextérieur.



1 ... Limite supérieure et inférieure, vitesse de perte d'air d'un édifice haut.

2 ... Moyenne, vitesse de perte d'air d'édifices hauts.

3 ... Vitesse de perte d'air d'un édifice
L'enveloppe de l'édifice et les volets d'aération du système mécanique fermés automatiquement, les systèmes fonctionnent

4 ... Vitesse de perte d'air d'un édifice,
L'enveloppe de l'édifice et les volets d'aération du système mécanique fermés manuellement, les systèmes fonctionnent

5 ... Vitesse de perte d'air d'un édifice,
L'enveloppe de l'édifice et les volets d'aération du système mécanique les systèmes sont fermés

6 ... Vitesse de perte d'air d'un édifice,
L'enveloppe de l'édifice seulement, les systèmes fonctionnent

FIGURE 3.3.1
COURBES DE FUITE D'AIR

3.3.4.2 Méthode des gaz traceurs

L'analyse des sacs d'air est effectuée sur place et la méthode à suivre se trouve dans le document D37, section 3.3.3. L'analyse des échantillons peut être effectuée en laboratoire, mais elle est le plus souvent effectuée sur place pour réduire les risques d'erreurs (perte d'échantillon à cause du dégonflement d'un sac, erreur passée inaperçue dans l'étiquetage d'un sac, omission de données fondamentales sur l'étiquette d'un sac, etc.).

Les résultats d'analyse des échantillons prélevés dans des zones de diffusion des gaz traceurs séparées sont obtenues au moyen du programme d'ajustement de courbe linéaire par la méthode des moindres carrés. Les données d'entrée du programme sont les différentes concentrations de gaz traceurs relevées à des intervalles connus (généralement compris entre 20 et 30 minutes). Le programme convertit les valeurs en fonction d'une échelle logarithmique et trace le graphe correspondant.

Le programme utilise ensuite une analyse régressive par la méthode des moindres carrés pour trouver l'équation de la courbe qui suit le mieux les points du graphe. La pente de la courbe est le taux de diminution moyen des chantillons analysés. Les taux de diminution de la concentration sont calculés séparément pour différentes pressions. Les taux de renouvellement d'air pour les pressions de l'essai sont déterminés à partir des taux de diminution de la concentration.

3.3.5 Affectation des ressources et calendrier

3.3.5.1 Méthode de la pression induite

Cette méthode exige l'intervention d'un chef d'équipe (professionnel), d'un technicien pour faire fonctionner le ventilateur étalonné, d'un ingénieur en mécanique pour vérifier les modes de fonctionnement des installations de ventilation mécanique, d'un gérant d'immeuble pour faire fonctionner dans les modes requis les installations mécaniques, et de plusieurs techniciens et ouvriers pour étancher et retirer l'étanchement des volets mécaniques des installations mécaniques.

L'analyse et le traitement des documents contenant les données sur les fuites d'air par cette méthode requièrent de 1 à 2 personnes semaines. On suppose cependant que d'autres informations sur les fuites d'air ont déjà été obtenues, analysées et comparées aux résultats obtenus avec cette méthode d'essai.

Voir 3.4.5.4 pour les ressources et le temps nécessaires pour enregistrer les pressions avec cette méthode.

3.3.5.2 Méthode des gaz traceurs

Cette méthode d'essai nécessite au moins l'intervention d'un chef d'équipe (professionnel), de deux personnes pour effectuer l'analyse des échantillons d'air (un chimiste et un technicien) et du gérant de l'immeuble pour obtenir différentes conditions de pression à l'intérieur de l'immeuble. Le nombre de personnes nécessaire pour injecter les gaz et prélever des échantillons d'air dépend dela taille de l'immeuble

et de la méthode utilisée pour effectuerces opérations. Généralement de 3 à 10 personnes suffisent (techniciens ou ouvriers). Si l'immeuble est pressurisé au moyen d'un ventilateur externe, un technicien pour faire fonctionner leventilateur est nécessaire pendant tout l'essai.

À cause de la complexité de la méthodologie de l'essai, environ 1 à 2 personnes semaines (un chef d'équipe et un chimiste) sont nécessaires pour préparer et se servir de l'équipement de cet essai. De 3 à 5 personnes jours sont nécessaires pour l'essai et le réglage de l'équipement sur place (un chef d'équipe, un chimiste et un technicien). L'injection des gaz et le prélèvement d'échantillons d'air nécessitent environ 6 heures par essai aux gaz traceurs pour une pression donnée et un supplément de 3 à 4 heures pour les essais à différentes pressions. Ces durées doivent être multipliées par la main–d'oeuvre nécessaire pour effectuer toutes les opérations afin de connaître le nombre total de personnes heures. L'analyse des échantillons d'air requiert de 8 à 16 personnes heures par essai.

L'analyse et le traitement des documents sur les échantillons d'air, les taux de diminution de la concentration des gaz en des emplacements particuliers et pour l'ensemble de l'immeuble ainsi que le calcul des taux de renouvellement d'air requièrent une personne semaine. Évidemment, le temps alloué dépend du nombre d'échantillons et du type d'analyse requis.

Voir 3.4.5.1, 3.4.5.3 et 3.4.5.4 pour l'affectation des ressources et le calendrier d'enregistrement des pressions nécessaires à l'application de cette méthode d'essai.

3.3.5.3 Implications multidisciplinaires des essais d'étanchéité à l'air

Il faut remarquer que d'autres essais peuvent être effectués en plus des essais d'infiltration et d'exfiltration d'air. Si un ventilateur étalonné est disponible pour les essais d'étanchéité à l'air, il peut servir pour des inspections par thermographie, pour des essais d'infiltration au gaz traceur et pour étalonner les ventilateurs d'extraction de l'immeuble. Divers types d'enregistrement des pressions et d'inspections par thermographie peuvent être effectués pendant les essais d'infiltration par la méthode des gaz traceurs. La combinaison des essais et des inspections peut conduire à une réduction du temps et du nombre de personnes nécessaires. Les méthodes d'essai qui sont décrites dans le présent document demandent beaucoup de travail, car seules quelques interventions peuvent être automatisées.

Comme les installations de ventilation mécanique de l'immeuble ne fonctionnent pas normalement et que les conditions de fonctionnement sont inhabituelles au cours des essais d'étanchéité à l'air, il n'est pas conseillé d'effectuer pendant cetemps des essais dans les disciplines suivantes : qualité de l'air, confort thermique, vérification de l'installation mécanique en marche, migration de la pollution, installations électriques, acoustique (bruits ambiants des espaces de travail).

Les essais qui ne sont pas perturbés par les essais d'étanchéité à l'air comprennent notamment : l'inspection par thermographie de l'enveloppe, l'enregistrement des bruits lorsque l'installation de ventilation mécanique est à l'arrêt, l'étude du fonctionnement et l'inspection de la manoeuvre des registres mécaniques et les mesures relatives à l'éclairage.

Comme le fonctionnement des installations de ventilation mécanique doit être modifié, les essais doivent avoir lieu en–dehors des heures de travail. Les membres de l'équipe d'étude de la qualité de l'air effectuent l'analyse des échantillons d'air (sacs). Des membres de l'équipe d'entretien des installations de ventilation mécanique doivent être présents pour régler et inspecter les installations de ventilation mécanique au cours des essais. D'autres personnes du service d'entretien doivent injecter les gaz traceurs, prélever les échantillons d'air, mettre en place les obturateurs des volets d'alimentation, d'évacuation et d'extraction, effectuer les inspections par thermographie, faire fonctionner le ventilateur étalonné et effectuer les mesures de pression.

Les mesures du confort thermique sont dérangées par les essais d'étanchéité à l'air et les essais des installations de ventilation mécanique, mais pas par l'enregistrement des différence de pression dans des conditions de fonctionnement normales. Il ne faut donc pas effectuer des mesures de confort thermique au cours des essais d'étanchéité à l'air ou des essais des installations de ventilation mécanique qui perturbent le fonctionnement normal de l'immeuble.

3.3.6 Documentation : création et archivage des documents de travail

3.3.6.1 Méthode de la pression induite

Les mesures du débit d'air et des pressions sont enregistrées au moyen d'un enregistreur à bande (graphique) comme mentionné en 3.4.6.1 et 3.4.6.4. Cette information est placée en annexe dans le rapport sur les fuites d'air. On présente en général ungraphique des valeurs de l'essai. Les courbes de fuite d'air sont déduites de ces valeurs. Les informations relatives aux paramètres décrivant les caractéristiques des fuites d'air sont obtenues à partir de ces valeurs. Toutes les analyses sont reproduites dans le rapport sur les fuites d'air.

3.3.6.2 Méthode des gaz traceurs

Les résultats de l'analyse des échantilonns d'air sont enregistrés sur un analyseur pour chromatographe gazeux et sur des bandes graphiques. Les résultats sont reportés sur des feuilles de relevés qui sont photocopiées et placées en annexe. Un graphique des aires et des autres données utiles sur les échantillons est tracé et inséré dans la même annexe. Ces données sont ensuite utilisées pour déterminer les taux de diminution de la concentration des échantillons et des volumes. L'analyse par ordinateur des données est placée en annexe avec les constatations et les conclusions.

4. RÉFÉRENCES

Liddament, M. and Thompson, C., **Techniques and Instrumentation for the Measurement of Air Infiltration in Buildings – A Brief Review and Annotated Bibliography**, Technical Note AIC 10, May 1983.

Hutcheon, N.B., and Handegord, G.O.P., **Building Science for a Cold Climate**, John Wiley and Sons, Toronto,1983.

Ma, W.Y.L., **The Average Pressure Tube Flowmeter for the Mesurements of the Rate of Airflow in Ventilating Ducts and for the Balancing of Airflow Circuits in Ventilating Systems**, J.I.H.V.E., Feb. 1967, p. 327 à 348.

Shaw, C.Y., and Jones, L., **Air Tightness and Air Infiltration of School Buildings**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 85, Part 1, 1979.

Shaw, C.Y., **Airtightness : Supermarkets and Shopping Malls**. ASHRAE JOURNAL, March 1981.

Shaw, C.Y., and tamura, G.T., **Projet de recherche sur l'économie d'énergie Mark XI – évaluation de l'étanchéité et de l'infiltration d'air**, Note de recherche en bâtiment n° 162F, CNRC, novembre 1981.

Shaw, C.Y., and Tamura, G.T., **Studies of Exterior Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 82, Part 1, 1976.

Shaw, C.Y., and Tamura, G.T., **The Calculation of Air Infiltration Rates Caused by Wind and Stack Action for Tall Buildings**, Vol. 83, Part 2, ASHRAE TRANSACTIONS, 1977. p.145 à 158.

Tamura, G.T., **The Calculation of House Infiltration Rates**, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol. 85, Part 1, 1979.

Tanaka, H., and Lee, Y., **Combined Effect of Wind, Temperature and Mechanical Ventilation on Pressure Differentials**.

5. ANNEXES

5.1 TERMINOLOGIE ET UNITÉS DE MESURE

taux de renouvellement d'air Rapport du taux volumétrique d'entrée (ou de sortie) de l'air dans un volume à ce volume. Il est exprimé en renouvellements d'air par heure (RAH)

débit d'air Vitesse de déplacement d'un volume ou d'une masse d'air, soit à l'intérieur d,un immeuble, soit àtravers les murs de l'enceinte d'un immeuble.

infiltration d'air Pénétration d'air par les fissures et les interstices de tout élément d'un immeuble et autour des portes, dues aux pressions créées par les installations de ventilation mécanique, le vent, les différences de masse volumique de l'air à l'intérieur et à l'extérieur, mesurée comme un taux de renouvellement d'air.

pression d'air Pression exercée par l'air. Il peut être question de la pression statique (pression atmosphérique) ou des éléments dynamiques de la pression due à un écoulement d'air, ou les deux ensemble.

anémomètre Instrument qui sert à mesurer la direction et la vitesse de déplacement de l'air ou d'un gaz.

étanchéité à l'air d'un immeuble En **général**, débit d'air ou taux de renouvellement d'air d'un immeuble particulier à des pressions données, utilisé pour décrire l'étanchéité à l'air de l'immeuble.
En **particulier**, débit en volume ou renouvellement d'air d'un immeuble pour une pressurisation et une différence de température données lorsque toutes les ouvertures sont étanchées.

transducteur de pression à condensateur Détecteur de pression à capacité variable. L'élément sensible est un diaphragme métallique qui agit comme une plaque du condensateur. Lorsqu'une pression est exercée, cette plaque se déplace vis–à–vis d'une autre plaque fixe, ce qui modifie l'épaisseur du diéléctrique intermédiaire. Le courant dans le circuit du condensateur est mesuré au moyen d'un circuit en pont.

méthode de la diminution de la concentration de gaz traceurs Échantillonnage de l'air à l'intérieur d'un immeuble dans lequel ungaz traceur de concentration connue a été injecté. La diminution de concentration dans le temps sert à déterminer les fuites d'air àtravers l'enceinte extérieure d'un immeuble.

dépressurisation Création dans un immeuble d'une pression intérieure inférieure à la pression extérieure. Pour effectuer des essais, la dépressurisation est obtenue au moyen d'un ventilateur étalonné ou des installations de ventilation mécanique de l'immeuble. Les débits d'air du ventilateur et au travers de l'enveloppe sont mesurés, ce qui permet d'évaluer l'étanchéité à l'air d'un élément ou de l'ensemble de l'immeuble.

coefficient de débit Terme C dans l'équation de débit classique:

$$Q = C.(\Delta P)^n$$

où Q = débit d'air en volume
ΔP = différence de pression de part et d'autre de l'enveloppe de l'immeuble
n = exposant de débit
C = débit pour $P = 1$ Pa

exposant de débit Dans l'équation précédente, n varie de 0.5 (écoulement turbulent) à 1.0 (écoulement laminaire).

manomètre magnahelic Manomètre à cadran compact de précision limitée servant à mesurer les différences de pression. L'élément actif de cet instrument est un tube de Bourdon auquel est fixé une armature magnétique plate qui tourne lorsque la pression augmente, ce qui modifie l'espace d'air entre l'armature et le circuit sensible (modification de l'inductance). Le signal obtenu sert à moduler un courant porteur.

manomètre Instrument de mesure de la pression par déplacement d'un liquide dans un tube en U. Les branches du tube en U peuvent être verticales, inclinées ou courbes.

pression négative Pression inférieure à la pression atmosphérique.

plan des différences nulles de pression (zone neutre) Plan où il n'existe pas de différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un immeuble.

pression positive Pression supérieure à la pression atmosphérique.

méthode de la pressurisation Méthode de détermination de l'étanchéité à l'air d'un immeuble ou d'un élément d'immeuble au moyen des installations de ventilation mécanique de l'immeuble ou d'un ventilateur étalonné placé sur l'enveloppe pour créer un excès de pression à l'intérieur de l'immeuble. En mesurant le débit du ventilateur et les différences de pression de part et d'autre de l'enveloppe, on peut déterminer l'étanchéité à l'air de l'immeuble.

Effet de tirage Différence de pression dans un immeuble causée par les différences de masse volumique de l'air dues à des températures intérieure et extérieure différentes.

état stable Maintien de conditions de pression et de température constantes pendant une période donnée pour permettre un écoulement constant de l'air et des pertes thermiques constantes à travers l'enveloppe d'un immeuble.

écoulement turbulent Écoulement caractérisé par des transferts d'énergie latéraux du fluide sous la forme de remous aléatoires.

5.2 NORMES APPLICABLES ET ORGANISMES DE RÉGLEMENTATION

1. Norme CAN/CGSB–149.10–M86 de l'ONGC

   Rédigée spécialement pour les entrepreneurs afin d'évaluer l'étanchéité à l'air des habitations et des bâtiments commerciaux. Les ventilateurs du commerce les plus puissants ne fournissent actuellement qu'un débit de 5 000 pi^3/min. En supposant des fuites d'air très faibles, de l'ordre de 0.25 renouvellement d'air par heure, la taille maximale des bâtiments qui peuvent être évalués au moyen de ces ventilateurs est d'environ 100 000 pi^2. Lorsque let aux de fuite d'air augmente, la taille des bâtiments qui peuvent être évalués diminue en proportion.

2. CEGEMC Guidelines Sept. 1981

   Limitent l'infiltration d'air à 0.5 renouvellement par heure à l'intérieur d'un périmètre situé à 4 m de l'immeuble pour une différence de pression de 100 Pa.

3. Norme E779–81 de l'ASTM

   La norme spécifie l'utilisation de la méthode de pressurisation et de la méthode de dépressurisation pour réduire les écarts dans les coefficients et les exposants consécutifs aux changements de direction des fuites d'air à travers les enceintes des immeubles.

5.3 LISTE DE DOCUMENTS ÉVALUANT LE RENDEMENT DES IMMEUBLES

Dans cette série, les documents sont subdivisés en quatre classes différentes. Les documents de classe A donnent des explications à savoir comment utiliser les documents des trois autres classes. La classe B est un répertoire d'essais lequel inclut un index et des références. Les documents de classe C donnent un compte rendu des trois domaines d'évaluation et résument les documents de classe D dans leur domaine respectif. Les documents de classe D contiennent une description des attributs du rendement des immeubles et donnent les méthodes pour les évaluer.

	A1	Guide du directeur de projet
	A2	Guide du gérant d'immeuble
	B1	Répertoire d'essais
Relevés	C1	Rendement énergétique et environnemental
	C2	Rendement fonctionnel
	C3	Rendement des systèmes et du matériel
Rendement énergétique et environnemental	D01	Évaluation des polluants
	D02	Migration de la pollution
	D03	Évaluation de l'ambiance thermique
	D04	Évaluation globale: rendement énergétique
	D05	Évaluation des secteurs de consommation: rendement énergétique
	D06	Évaluation des installations et systèmes: rendement énergétique
	D07	Évaluation des améliorations: rendement énergétique
	D08	Évaluation de l'environnement acoustique
	D09	Évaluation de la circulation d'air
	D10	Évaluation de l'éclairage
	D11	Relevé des données atmosphériques
Rendement fonctionnel	D20	Analyse des documents et archives
	D21	Annotation des plans
	D22	Entrevues centrées
	D23	Questionnaires
	D24	Observations
Rendement des systèmes et du matériel	D30	Murs et colonnes structuraux: relevé de la condition
	D31	Dalles et toîts structuraux: relevé de la condition
	D32	Garages de stationnement: relevé de la condition
	D33	Évaluation des installations mécaniques
	D34	Évaluation des contrôles mécaniques
	D35	Évaluation des systèmes électriques
	D36	Contrôle de la pression et de l'étanchéité à l'air
	D37	Mesure de la vitesse d'échange d'air extérieur
	D38	Inspections par thermographie de l'enceinte d'un immeuble
	D39	Mesure de la résistance thermique
	D40	Inspections de la teneur en humidité
	D41	Évaluation des systèmes de couvertures